KERNTECHNIK

IM BLICKPUNKT

VEB
Fachbuchverlag
Leipzig









Dr. rer. nat. Gerhard Blumentritt
Dr. rer. nat. Lothar Schwaar

Mit 142 Bildern

KERNTECHNIK

IM BLICKPUNKT

VEB
Fachbuchverlag
Leipzig

1. Auflage
Lizenznummer: 114-210/44/78
LSV 3009
Gesamtgestaltung: Lothar Gabler, Leipzig
Printed in GDR
Satz und Druck: V. Druckerei Volksstimme Magdeburg
Redaktionsschluß: 30.6.1978
Bestellnummer: 546 367 4
DDR 16,- M

Geleitwort

In einer außerordentlich stürmischen Entwicklung eroberte sich die Kernforschung seit der Jahrhundertwende einen bedeutsamen Platz in der menschlichen Gesellschaft. Entscheidend haben die Erkenntnisse über die Welt im Inneren des Atoms unser physikalisches Weltbild verändert, und bei der philosophischen Interpretation der Ergebnisse hat sich der dialektische Materialismus glänzend bestätigt. Die atom- und kernphysikalischen Präzisionsmeßmethoden und die Isotopen- und Strahlentechnik haben in Wissenschaft und Technik und insbesondere auch in der Medizin ein qualitativ neues Niveau der Kontroll- und Nachweistechnik ermöglicht und dadurch zu wesentlichen Umgestaltungen von Arbeitsmethoden und -techniken beigetragen. Die außerordentlich hohen Anforderungen der Kernforschung an die Elektronik, die Präzisionstechnik, die Werkstoffe, die Produktionstechnologien und die Automatisierung beeinflussen wesentlich die Entwicklung der Produktivkräfte. Man betrachtet gerade deshalb die Kernforschung als ein eindrucksvolles Beispiel für die wissenschaftlich-technische Revolution, die im Begriff ist, die Produktivkräfte der menschlichen Gesellschaft neu zu gestalten.

Einen nachhaltigen Einfluß auf die menschliche Gesellschaft hat dabei zweifellos die Erschließung der Kernenergie ausgeübt. Man kann diese Leistung nicht hoch genug einschätzen, da sie der Menschheit eine unerschöpfliche Primärenergiequelle in die Hand gegeben hat. Auf der anderen Seite stellt diese Energiequelle aber auch hohe Anforderungen an die politische und moralische Reife der menschlichen Gesellschaft. Das wurde der Menschheit 1945 drastisch vor Augen geführt, als die Vereinigten Staaten von Amerika zwei Atombomben auf Japan abwarfen. Und wenn wir heute hören, daß die Angst vor Terror, Erpressung und menschlichem Versagen ernsthafte Wissenschaftler in den kapitalistischen Industriestaaten dazu führt, sich gegen die Entwicklung der Kernenergie zu wenden, so spricht das nicht gegen die Kernenergie, sondern gegen das kapitalistische System.

Die große Rolle, die die Kernforschung und ihre technischen Ergebnisse heute in der Weltpolitik, in der Entwicklung von Wissenschaft und Technik und in vielen anderen Bereichen der Gesellschaft spielen, ruft das Bedürfnis weiter interessierter Kreise ohne spezielle physikalische Ausbildung für eine ausreichende Information auf diesem Gebiet hervor. Eine solche Information kann auch wesentlich dazu beitragen, die Ergebnisse der Kernforschung noch effektiver und breiter in der Praxis zum Einsatz zu bringen. Das vorliegende Buch erfüllt dabei eine dankenswerte Verpflichtung.

Prof. Dr. sc. nat. S. Collatz
Stellv. Direktor für kernenergetische Forschung
im Zentralinstitut für Kernforschung Rossendorf

Inhaltsverzeichnis

1

Der Weg zur Kernspaltung



Detektoren für Kernstrahlung



Meßsysteme für Kernstrahlung



Radionuklide für die Industrie



Hilfsmittel in der Medizin



Strahlenabsorption und ihre Nutzung



Anwendung im Forschungsbereich



Die Kettenreaktion im Kernreaktor



Energie aus Kernkraftwerken



Druckwasserreaktoren (DWR)



Hochtemperaturreaktoren (HTR)



Schnelle Brutreaktoren (SBR)

13

Kernenergetik – ein neuer Industriezweig



Kernexplosionen

Vorwort

Durch das rasche Fortschreiten von Wissenschaft und Technik wird es für uns alle immer schwieriger, die vielen interessanten Entwicklungsrichtungen zu verfolgen. Bei der Kerntechnik und Kernenergetik kommt erschwerend hinzu, daß für die meisten solche Vorgänge wie Kernspaltung, Kettenreaktion oder radioaktive Strahlung fachlich nur schwer verständlich sind. Da diese und ähnliche Begriffe aber immer häufiger auftreten, stellt sich dieses Buch die Aufgabe, einem weiten Leserkreis derartige Vorgänge in eine verständliche Form zu übersetzen. Besondere Vorkenntnisse werden dabei nicht vorausgesetzt.

Das Ziel des Buches ist es nicht, eine vollständige Darstellung zu erreichen. Vielmehr sollen die wesentlichen Probleme behandelt und ein Einblick in den gegenwärtigen Entwicklungsstand der Kerntechnik gegeben werden. Der Leser kann daraus erkennen, welche Bedeutung die Kernenergie heute hat und in Zukunft erreichen wird.

Um dem interessierten Leser den Weg in die »Welt der Atome« zu ebnen, wird die Geschichte der Atom- und Kernphysik von der Jahrhundertwende bis zur Entdeckung der Kernspaltung verfolgt. Es schließt sich eine Beschreibung der Nachweistechnik für Kernstrahlung an. Auf dieser Grundlage stellen wir eine Auswahl von Anwendungen radioaktiver Substanzen in Forschung, Medizin und Industrie vor. Für diese Aufgaben stellt der VEB RFT Meßelektronik »Otto Schön« Dresden zahlreiche Geräte bereit.

Der Ablauf der gesteuerten Kettenreaktion im Kernreaktor wird ausführlich geschildert. Darauf aufbauend werden anhand der aussichtsreichsten Reaktorbaulinien die Möglichkeiten der Energiebereitstellung aus Kernkraftwerken und die damit zusammenhängenden Fragen dargestellt.

Der Beginn des Atomzeitalters war durch den Mißbrauch der Kernenergie von seiten der USA, durch die Entwicklung von Kernwaffen und den Abwurf zweier Atombomben auf Japan überschattet. Wie kam es dazu? Welche Wirkung hat eine Atombombe? Was geschah und geschieht, um die Kernenergie nur friedlichen Zwecken zuzuführen? Diesen Problemen ist ein besonderer Abschnitt gewidmet.

Das Zentralinstitut für Kernforschung in Rossendorf bei Dresden leistet einen wesentlichen Beitrag zur friedlichen Nutzung der Kernenergie in der DDR. An einigen Beispielen wird gezeigt, wie Forschung und industrielle Praxis dabei verbunden sind.

Ein Ausblick auf die erwartete Energiequelle der Zukunft, die Kernfusion, soll das Bild abrunden.

An dieser Stelle möchten wir allen Fachkollegen, die uns mit Hinweisen unterstützt haben, unseren Dank sagen. Insbesondere danken wir Herrn Prof. Dr. sc. *S. Collatz*, Herrn Dr. *D. Lehmann* und Herrn Doz. Dr. sc. *S. Gursky* für die sorgfältige und kritische Durchsicht des Manuskripts. Dank gebührt auch dem Verlag und seinen Mitarbeitern für die Unterstützung bei der Gestaltung des Buches.

Die Verfasser

Der Weg zur Kernspaltung

1

Das Atom

Schon im Altertum hatte man die Überzeugung gewonnen, daß die materielle Welt nur dann zu verstehen ist, wenn man etwas über ihre kleinsten Teile weiß. Deshalb haben sich schon viele Forscher mit der Frage beschäftigt: Was geschieht, wenn wir die uns umgebenden Gegenstände immer weiter zu teilen suchen?
Man kann sich vorstellen, daß man diesen Versuch nicht beliebig oft wiederholen kann und zuletzt eine weitere Teilung nicht mehr möglich ist. Das würde uns zu der Annahme zwingen, daß sich alle Stoffe aus kleinsten, irgendwie geformten Bausteinen, aus Atomen, zusammensetzen. Der Grundgedanke der auf dieser Vorstellung aufbauenden Atomtheorie ist folgender: Es gibt verschiedene Sorten von kleinsten Teilchen, aus denen alle Gegenstände bestehen, aber nicht beliebig viele, sondern nur eine beschränkte Anzahl. Dieser Gedanke fand in den vergangenen Jahrzehnten schon unzählige Male seine Bestätigung in der Praxis der naturwissenschaftlichen Forschung.

Atomhypothese

Heute arbeitet man mit diesen kleinsten Gebilden, untersucht sie mit physikalischen und chemischen Methoden und hat dabei gelernt, daß die Atome genauso vorhanden sind wie alle anderen Dinge, mit denen man experimentieren kann. Die Atome kann man wegen ihrer geringen Größe aber nicht direkt sehen. Erst in den letzten Jahren gelang es, sie mit speziellen, sehr aufwendigen Elektronenmikroskopen sichtbar zu machen. Bis dahin – und in den meisten Laboratorien auch jetzt noch – hat man einzelne Atome nur an ihrer Wirkung nachweisen können. So war es schwer, den verständlichen Drang nach einer anschaulichen Vorstellung zu befriedigen.
Den ersten Vorstoß in dieser Richtung unternahmen die griechischen Naturphilosophen, die mit großer Phantasie die Struktur der Stoffe zu enträtseln versuchten. So behauptete z. B. Plato, daß die kleinsten Teilchen der Materie aus speziellen rechtwinkligen Dreiecken gebildet seien. Diese kann man paarweise zu gleichseitigen Dreiecken oder Quadraten zusammensetzen und daraus dann die regulären Körper der Stereometrie Würfel, Tetraeder, Oktaeder und Ikosaeder aufbauen. Die vier Körper sind dann die Grundeinheiten der vier Elemente Erde, Feuer, Luft und Wasser. Solche und ähnliche Modelle muß man heute als Spekulationen empfinden, die bestenfalls zu entschuldigen sind durch den Mangel an eingehenden empirischen Kenntnissen im alten Griechenland.

Bilder von Atomen

Wir sollten auch bestimmte Bilder von Atomen, die hin und wieder in allgemeinverständlichen Büchern zu finden sind, nicht zu ernst nehmen. Diese Abbildungen sind oft sehr oberflächlich und erschweren das tiefere Eindringen in die Probleme. Deshalb sollte uns klar sein, daß sie nur ein sehr unzulängliches Hilfsmittel für die Wiedergabe der Struktur der Atome darstellen.

Die Hypothese über die Existenz von Atomen wurde im 17. Jahrhundert experimentell bestätigt, als man bewußt begann, die den Menschen umgebende Natur zu erforschen. Im Gegensatz zu früher beschränkte man sich zu dieser Zeit nicht mehr allein auf die Beobachtung, sondern führte Experimente zur Überprüfung von Hypothesen aus und hielt die Ergebnisse zahlenmäßig fest.

Im Jahre 1808 formulierte *John Dalton,* Lehrer für Mathematik und Naturphilosophie in der Stadt Manchester, nach sorgfältiger Untersuchung chemischer Reaktionen erstmals eindeutig den Begriff des chemischen Elements: Ein Element ist ein Stoff, der aus Atomen ein und desselben Typs besteht.

Weitere chemische Untersuchungen ergaben, daß sich die Atome durch ihre relativen Atommassen unterscheiden lassen, obwohl nach wie vor über die absolute Größe und Masse der Atome nichts bekannt war. Eine erste Abschätzung der Zahlenwerte gelang 1865 dem Wiener Physikdozenten *Joseph Loschmidt.* Bei der Untersuchung der Fähigkeit von Gasen, sich miteinander zu vermischen, fand er heraus, daß die Größe aller Atome ungefähr gleich ist und etwa 10^{-10} m beträgt. Für die Masse eines Wasserstoffatoms erhielt man den geringen Wert von nur 10^{-24} g.

Stabilität der Atome

Wenden wir uns nun dem Grundproblem der Atomtheorie zu. Das ist die Frage, warum es in der materiellen Welt immer wiederkehrende Formen und Qualitäten gibt. *Heisenberg* schrieb dazu: »Warum z. B. die Flüssigkeit Wasser mit all ihren charakteristischen Eigenschaften immer wieder neu gebildet wird, beim Schmelzen des Eises oder beim Kondensieren des Wasserdampfes oder beim Verbrennen von Wasserstoff. Das ist in der bisherigen Physik zwar immer vorausgesetzt, aber niemals verstanden worden. Wenn man sich die materiellen Körper, zum Beispiel das Wasser, als aus Atomen zusammengesetzt denkt – und die Chemie macht ja von dieser Vorstellung erfolgreich Gebrauch –, so würden die Bewegungsgesetze, die wir als Newtonsche Mechanik in der Schule gelernt haben, niemals zu Bewegungen der kleinsten Teile von einem solchen Stabilitätsgrad führen können. An dieser Stelle müssen also Naturgesetze ganz anderer Art wirksam werden, die dafür sorgen, daß sich die Atome immer wieder in der gleichen Weise anordnen und bewegen, so daß immer wieder Stoffe mit den gleichen stabilen Eigenschaften entstehen.«

Wir wissen heute, daß die menschliche Phantasie nicht ausreicht, um die Verhältnisse in der »Welt der Atome« zu erraten. Deshalb müssen zuerst die durch experimentelle Untersuchungen gesicherten Kenntnisse zusammengetragen werden. Erst dann kann man die Ergebnisse im Rahmen einer Modellvorstellung interpretieren. Dazu gehört aber oft noch eine Portion Glück, damit der Forscher mit einer neuen, weitreichenden Erkenntnis an die Öffentlichkeit treten kann.

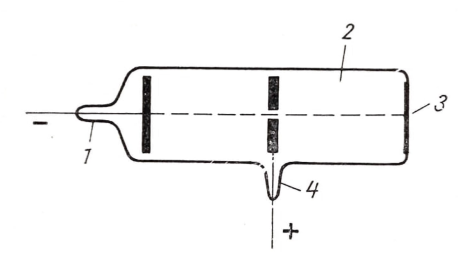
»Rätselhafte« Strahlen

Im Jahre 1895 war es *Wilhelm Conrad Röntgen* beschieden, den entscheidenden Schritt zu tun und mit der Entdeckung einer neuen Art von Strahlen der Physik eine völlig andersartige Welt, die Welt der Atome, zu erschließen. *Herneck* schrieb darüber: »Wenn auch nicht jede der weiteren physikalischen Errungenschaften unmittelbar an sie anknüpfte, so gab es doch nur wenige große Entdeckungen, die auf die Dauer ohne Beziehung zu den Röntgenstrahlen blieben. Der Ausbau der Lehre von der Atomhülle und die Erforschung der Gitterstruktur der Kristalle wären ohne sie unmöglich gewesen. Die Auffindung der Radioaktivität wurde sogar unmittelbar durch *Röntgens* erste Mitteilung angeregt.«

1 *Wilhelm Conrad Röntgen*



2 *Katodenstrahlen*
1 *Katode;* 2 *Katodenstrahl;*
3 *Leuchten;* 4 *Anode*

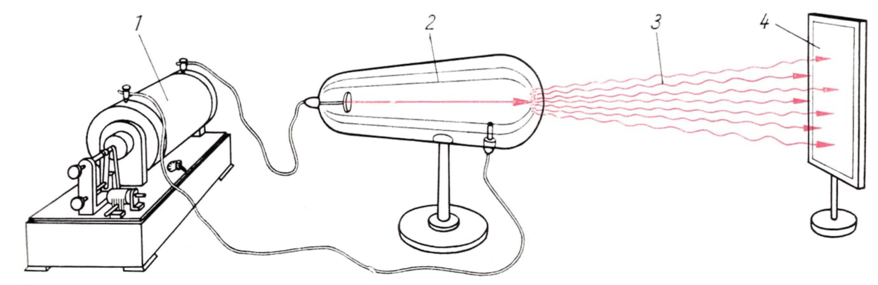


Von nun an erwies es sich, daß das bisher so vollständig abgeschlossene Weltbild der klassischen Physik vor umwälzenden Fortschritten stand (Bild 1).

Unsichtbare Strahlen

Diese grundlegende Entdeckung gelang *Röntgen* natürlich nicht zufällig. Schon *Faraday* hatte 1838 den Glimmstrom beschrieben, der in einer Vakuumröhre entsteht, wenn eine hinreichend hohe Gleichspannung an zwei Elektroden gelegt wird. 1858 entdeckte *Plücker* die Katodenstrahlen, die in einer solchen Röhre bei sehr niedrigem Gasdruck von der negativen Elektrode ausgehen und die gegenüberliegende Glaswand zum Leuchten bringen (Bild 2). Zuerst hatte *Hittorf* diese Strahlen näher untersucht, die nicht nur die Glaswand, sondern auch sehr viele andere Stoffe, insbesondere Mineralien und Salze, zur unmittelbaren Lichtaussendung anregen.
Goldstein zeigte 1886, daß die Katodenstrahlen Gasmoleküle verändern können. Die dadurch positiv geladenen Gasteilchen bewegen sich in einer Entladungsröhre entgegen den Katodenstrahlen und fliegen durch die Katode hindurch, wenn sie mit geeigneten Kanälen (Durchbohrungen) versehen ist. Sie werden deshalb Kanalstrahlen genannt.
In jedem Hochschullaboratorium gab es zu jener Zeit einen Funkeninduktor mit einem Unterbrecher zur Hochspannungserzeugung, Gasentladungsröhren und Leuchtschirme, ähnlich unseren heutigen Fernsehbildschirmen. Mit diesen

3 *Röntgens einfachste Versuchsanordnung*
1 *Funkeninduktor;* 2 *Katodenstrahlen;* 3 *X-Strahlen;* 4 *Fluoreszenzschirm*



Geräten wurden, anfangs vorwiegend aus praktischem Interesse wegen der Bedeutung für die elektrische Beleuchtung, die Gasentladungsvorgänge untersucht (Bild 3). *Heinrich Hertz* fand, daß Katodenstrahlen auch feste und flüssige Stoffe in dünnen Schichten durchdringen. *Lenard* nutzte diese Eigenschaft, um die Strahlen aus dem Gasentladungsrohr durch eine gestützte Aluminiumfolie heraustreten zu lassen. *Thomson* wies 1895 durch Ablenkung der Strahlen in elektrischen und magnetischen Feldern nach, daß sie tatsächlich aus negativen Ladungsträgern mit sehr geringer Masse, den Elektronen, bestehen. So war der Boden für weitere Entdeckungen vorbereitet.

Nächtliches Experiment

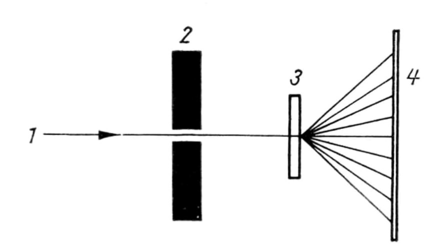
Röntgen war ein einsamer Forscher. Oft arbeitete er allein bis in die tiefe Nacht im Institut, damit er ungestört seine Versuche machen und seinen Problemen nachgehen konnte. Am Abend des 8. November hatte er eine Vakuumröhre mit schwarzem Papier verkleidet, das alle sichtbaren und ultravioletten Strahlen zurückhalten sollte. Der Zweck des Experiments war, die Eigenschaften der Katodenstrahlen genauer kennenzulernen. Als er im verdunkelten Raum die Hochspannung an die Röhre legte, überraschte ihn das Aufleuchten von Kristallen auf dem Experimentiertisch und fahlgrünes Licht auf einem in der Nähe stehenden Leuchtschirm. War das eine »neue Art von Licht«? Die Natur der neuen Strahlen blieb zunächst rätselhaft, deshalb nannte *Röntgen* sie X-Strahlen. Er untersuchte diese Strahlen in kurzer Zeit so gründlich, daß in den folgenden Jahren kaum weitere neue Eigenschaften bekannt wurden. Die damals schon von *Röntgen* erkannten praktischen Anwendungsmöglichkeiten der später nach ihm benannten Strahlen sind heute so stark verbreitet, daß sie schon fast jedes Schulkind kennt.

Röntgens Leistung

Wie kam es, daß gerade *Röntgen* und nicht irgendein anderer das Wesentliche der neuen Erscheinung zuerst erkannte? Ausführlich geht auf diese Frage *Herneck* ein, der in seinem Buch »Bahnbrecher des Atomzeitalters« die geschichtliche Größe der Naturforscher dieser Zeit ausführlich würdigt. Eine Antwort gibt uns auch die Glückwunschadresse der Berliner Akademie an *Röntgen* aus dem Jahre 1919. »Die Geschichte der Wissenschaft lehrt, daß bei jeder Entdeckung Verdienst und Glück sich in eigenartiger Weise verketten, und mancher weniger Sachverständige wird vielleicht geneigt sein, in diesem Falle dem Glück einen überwiegenden Anteil zuzuschreiben. Wer sich aber in die Eigenart Ihrer wissenschaftlichen Persönlichkeit vertieft hat, der begreift, daß gerade Ihnen, dem von allen Vorurteilen freien Forscher, welcher die vollendete Experimentierkunst mit höchster Gewissenhaftigkeit und Sorgfalt verbindet, diese große Entdeckung gelingen mußte.«
Auf die Frage, was er sich beim Aufleuchten des Kristallschirmes gedacht habe, erwiderte *Röntgen*: »Ich dachte nicht, sondern ich untersuchte.« Das unterschied ihn von anderen Forschern, die auf demselben Gebiet arbeiteten und den gleichen Effekt als unverständliche Nebenerscheinung nicht weiter verfolgt hatten. *Max von Laue* schrieb: »Was das für eine Tat gewesen war, erkennt man besonders, wenn man die große Zahl anderer, zum Teil recht bedeutender Physiker ins Auge faßt, welche vor Röntgen mit denselben Hilfsmitteln experimentiert und die Strahlen nicht entdeckt hatten. Zu einem solchen Vorstoß in ein ganz ungeahntes Land gehört außer einem offenen Auge für das, was vorgeht, auch ein ungeheurer Mut, dazu eine Selbstbeherrschung, die trotz der Freude und der Aufregung über die ersten Funde die Ruhe und geistige Klarheit bewahrt.«
Als erster Wissenschaftler der Welt erhielt *Wilhelm Conrad Röntgen* im Dezember 1901 den Nobelpreis für Physik.

Röntgenstrahlen sind Wellen

Es war lange vermutet worden, daß Röntgenstrahlen noch kurzwelligeres Licht sind als das Ultraviolett. Im Jahre 1912 wurde es durch *Max von Laue*, *Walter Friedrich* und *Paul Knipping* bewiesen, denen es gelang, Röntgenstrahlen zur Interferenz zu bringen.
Interferenzerscheinungen entstehen, wenn man ein geteiltes Lichtbündel wieder



4 Beugung von Röntgenstrahlen
1 *Röntgenstrahl;* 2 *Blei;* 3 *Kristall;*
4 *Fotoplatte*

auf einem Schirm vereinigt. Beide Bündel für sich erzeugen einen Lichtfleck von gewisser Beleuchtungsstärke. Zusammen bewirken sie jedoch nicht gleichmäßig die doppelte, sondern an manchen Stellen die vierfache Helligkeit. Dafür löschen sie sich an anderen Orten ganz aus. Dieser Effekt läßt sich erklären, wenn man dem Licht Wellencharakter zuschreibt. Fällt das Maximum der einen Welle gerade mit dem Maximum der anderen zusammen, so entsteht die doppelte Amplitude und deshalb die vierfache Intensität. Trifft dagegen das Maximum der einen Welle gerade auf das Minimum der anderen, so kompensieren sie sich, wenn beide die gleiche Amplitude haben, und die Intensität ist dann null.
Wegen der vermuteten kleinen Wellenlänge der Röntgenstrahlen konnte man damals zur Erzeugung der Interferenz mittels Beugung keine mechanisch hergestellten Gitter benutzen. *Laue* machte den genialen Vorschlag, als Beugungsgitter Kristalle zu benutzen. Die Kristalle bilden, wie man schon damals vermutete, Raumgitter, ihre Atome sind in ihnen räumlich regelmäßig angeordnet. Stellt man einem feinen Bündel von Röntgenstrahlen einen Kristall in den Weg, so findet an jedem Atom eine Beugung statt. Die gebeugten Strahlen überlagern sich. Der genannte Effekt der Verstärkung der Intensität bzw. der gegenseitigen Auslöschung kann durch Schwärzung einer fotografischen Platte festgehalten werden (Bild 4). Auf diese Weise wurde nicht nur die Wellennatur der Röntgenstrahlen bewiesen, sondern auch ihre Wellenlänge gemessen. Die nach *Debye* und *Scherrer* genannte Methode, bei bekannter Wellenlänge aus den Interferenzen auf den Bau der Kristallgitter zu schließen, wurde von den beiden Forschern um 1915 ausgearbeitet. Sie ist wohl die handlichste Methode zum Bestimmen der Kristallstruktur und hat der Kristallographie unschätzbare Dienste geleistet.

Strahlenfieber

Röntgen hatte im Januar 1896 Physikern in aller Welt Sonderdrucke über die Entdeckung der X-Strahlen gesandt. Er tauschte ständig mit über hundert Wissenschaftlern Publikationen aus. Auch die Tagespresse berichtete in fast allen Ländern über die sensationelle Entdeckung. Die Physiker prüften die Angaben nach. In den folgenden beiden Jahren erschienen etwa 2000 Veröffentlichungen über diese Untersuchungen, das ist für die damalige Zeit sehr viel.
Ein wahres »Strahlenfieber« setzte ein, jedoch stellte sich die Entdeckung weiterer neuartiger Strahlen meist als Selbsttäuschung heraus. Doch in Paris hatte *Henri Poincaré* eine Idee, die weiterführen sollte. Er warf die Frage auf, ob nicht etwa alle fluoreszierenden Stoffe nach der Einwirkung von Sonnenlicht eine Art von Strahlen aussenden, die den Röntgenstrahlen ähnlich sind. *Henri Becquerel,* Professor an der Technischen Hochschule zu Paris, ging sofort daran, die Vermutung zu prüfen. Tatsächlich stellte er fest, daß Uransalz nach Einwirkung von Sonnenlicht Strahlen aussendet, die lichtdicht verpacktes Fotopapier schwärzen. Aber schon wenig später wurde die gleiche Wirkung auch ohne Sonnenbestrahlung entdeckt. Die Strahlen gingen vom Uransalz ununterbrochen ohne vorherige Anregung aus und waren wie die Röntgenstrahlen imstande, die Luft elektrisch leitend zu machen, doch ihr Wesen blieb noch rätselhaft.

Magische Uranstrahlen

Es war ein Zufall, daß unter den von *Becquerel* untersuchten fluoreszierenden Stoffen Uransalz war, das damals vorwiegend in der Glasindustrie verwendet wurde. Doch damit erschien das Uran, das später noch eine sehr wichtige Rolle spielen sollte, das erste Mal in der Geschichte der Kernphysik.

Erforschung der strahlenden Stoffe

Der Ursprung der magischen Uranstrahlen war ein Rätsel, dessen Lösung der jungen Physikerin *Marie Curie* sehr verlockend erschien. Sie begann mit der Messung der Ionisationsfähigkeit dieser Strahlen und wandte dabei die Methode an, die von ihrem Mann *Pierre Curie* gemeinsam mit seinem Bruder Jacques für das Studium anderer Phänomene erfunden worden war. Wesentliche Geräte bei den Experimenten waren Ionisationskammer und Elektrometer. Doch *Marie Curie* erhielt keine öffentliche Unterstützung. Die Pariser Fachschule für Physik stellte nur eine Abstellkammer als Arbeitsraum kostenlos zur Verfügung. Wochenlange Versuche brachten das Ergebnis, daß sich die neue Strahlung nicht durch äußere Umstände, wie Beleuchtung und Temperatur, beeinflussen läßt und ihre Stärke der in den untersuchten Mineralien enthaltenen Uranmenge proportional ist. Bei Experimenten mit anderen Mineralien konnten beim Thorium ähnliche Strahlen registriert werden. *Marie Curie* schlug für die Eigenschaft gewisser Atome, Strahlen auszusenden, den Namen Radioaktivität vor. Die strahlenden Stoffe sollten radioaktive Elemente heißen (Bild 5).

Radioaktivität

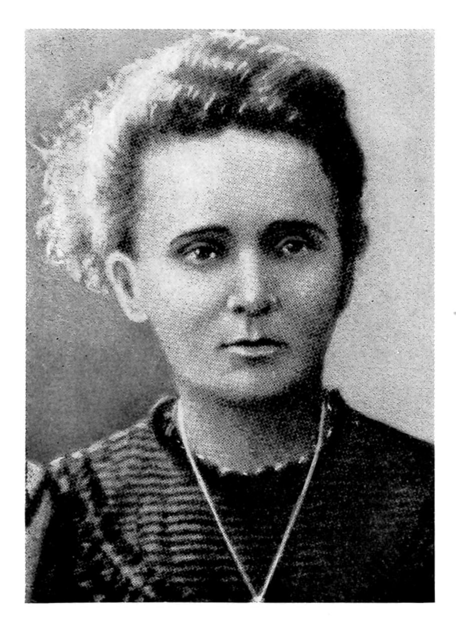
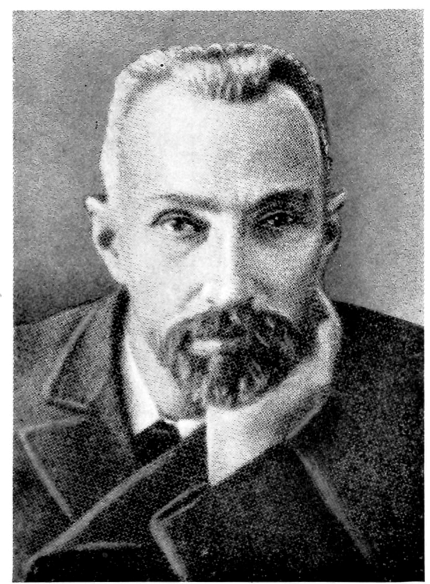
Bei den Mineralien Pechblende und Chalkolith zeigte sich eine unverhältnismäßig hohe Strahlungsstärke. Es mußte ein Stoff enthalten sein, der eine viel größere Radioaktivität aufwies als das Uran. Im Frühjahr 1898 beteiligte sich auch *Pierre Curie* tatkräftig an den Untersuchungen, und es begann jene beispielhafte und beglückende Arbeitsgemeinschaft. Die gesuchte Substanz wurde als eine Begleitsubstanz des Wismuts erkannt und nach der Heimat *Marie Curies* Polonium genannt. Ende 1898 entdeckten beide Forscher ein noch weitaus stärkeres radioaktives Element als Begleitsubstanz des Bariums und nannten es Radium, das »Strahlende«.

Entdeckung des Radiums

Fast alle Fachleute dieser Zeit verhielten sich den neuen Entdeckungen gegenüber sehr zurückhaltend. Deshalb mußte noch die sehr schwierige Aufgabe gelöst werden, die physikalisch nachgewiesenen Elemente durch Trennungsverfahren abzusondern, damit sie chemisch mit den gebräuchlichen Methoden geprüft werden konnten. Es fehlte aber an Geld, um größere Mengen Pechblende zu kaufen. Da wies ein glücklicher Gedanke den Weg zu den geeigneten Ausgangssubstanzen. Es war anzunehmen, daß nach Gewinnung der Uransalze für die Glasindustrie, die Abfallprodukte noch genügend Polonium und Radium enthielten. Durch Vermittlung erhielt das französische Physikerehepaar eine Tonne Pechblendenschlacke kostenlos. Damit begann in einem Holzschuppen auf dem Hofe der Ecole de Physique ein vier Jahre dauerndes unermüdliches Ringen um die strahlende Substanz.
Im Jahre 1902 hatten die *Curies* als Lohn für ihre Beharrlichkeit endlich ein Zehntel Gramm Radiumchlorid gewonnen und alle Eigenschaften des neuen Elements bestimmt. Weitere Untersuchungen galten der physiologischen Wirkung der Radiumstrahlen bei ihrer Anwendung in der Therapie und für andere praktische Aufgaben.

Zur Physik um die Jahrhundertwende

Die Physik befand sich um die Jahrhundertwende durch die zuletzt gewonnenen Erkenntnisse in einem verheißungsvollen Aufschwung. Man war in der Lage, mit Elektronen zu experimentieren und versuchte auf diese Weise, das Innere eines Atoms zu erschließen. Die nach ihrem Entdecker benannten Röntgenstrahlen und die von radioaktiven Quellen ausgesandten Strahlen erweckten die Hoffnung, daß man mit ihrer Hilfe erfahren könnte, wie die Atome in den Stoffen angeordnet und ob sie wirklich die kleinste Einheit der Materie sind. Doch es fehlte noch der entscheidende Schritt zum Verständnis einer Struktur der Atome und der Kräfte, welche die Materie zusammenhalten.

5 Marie und Pierre Curie

Schwarze Körper

Hilfe sollte von einer Seite kommen, von der sie nicht erwartet worden war. Seit Jahrzehnten beschäftigten sich die Physiker schon mit den Wärmestrahlen. Das Problem der Änderung der Strahlungsintensität von sogenannten »schwarzen Körpern« harrte noch der Lösung. Die theoretische Beschreibung der im Experiment gefundenen Ergebnisse für die Wärmestrahlung führte immer wieder zu bisher nicht lösbaren Schwierigkeiten. Dies schien aber nicht nur ein mathematisches Problem zu sein. Das seit *Newton* in der Physik vorherrschende klassische mechanistische Weltbild genügte offensichtlich nicht mehr zur Deutung der inzwischen aufgedeckten Naturzusammenhänge. Auf der Suche nach einem Ausweg aus den Schwierigkeiten gab es zwei wesentliche Richtungen.

Energetik

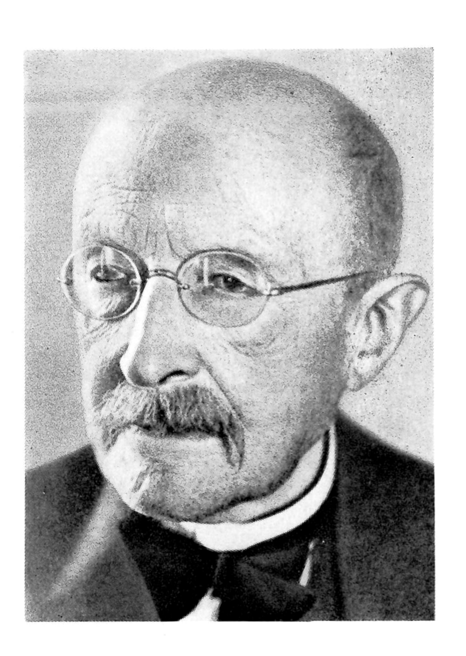
Als Energetik bezeichnete man die Auffassungen, wie sie von dem Mathematiker *Georg Helm* in Dresden und vor allem von dem Chemiker *Wilhelm Ostwald* in Leipzig vertreten wurden. Statt der Materie stand die Energie im Mittelpunkt des Weltbildes. Alle Erscheinungen in Natur und Gesellschaft wurden auf energetische Vorgänge zurückgeführt, und gleichzeitig wurde der Anspruch erhoben, daß nur auf diese Weise die einzig richtige Deutung aller Erscheinungen gegeben werden könne.

Atomistik

Die durch *Ludwig Boltzmann* vertretene atomistische Theorie hat ihre Wurzeln in der kinetischen Gastheorie. Schon 1738 wurde, insbesondere von dem Mathematiker *Daniel Bernoulli*, erkannt, daß man die wichtigsten Eigenschaften der Gase verstehen kann, wenn man annimmt, daß sich die einzelnen Moleküle, aus denen das Gas zusammengesetzt sein soll, in einer ständigen Bewegung befinden.

2. Hauptsatz der Thermodynamik

1850 formulierte der deutsche Physiker *Rudolph Clausius* den 2. Hauptsatz der Thermodynamik und legte nach 1856 zusammen mit *Krönig* den Grundstein für die moderne kinetische Gastheorie. Dieser Hauptsatz war 50 Jahre später immer noch ein wesentlicher Streitpunkt zwischen Energetikern und Atomisten. *Max Planck* hatte sich in seiner im Jahre 1879 vollendeten Dissertation ebenfalls mit diesem Stoff auseinandergesetzt und für die der Ableitung des Hauptsatzes zugrunde liegende Hypothese eine neue, einfachere, aber bis zur letzten Konsequenz logisch durchdachte Formulierung gefunden. Sie lautet: »Der Prozeß der Wärmeleitung läßt sich auf keinerlei Weise vollständig rückgängig machen.«



6 *Max Planck*

Im Meinungsstreit mit den Energetikern trat *Planck* nicht direkt für die Atomtheorie, aber als Sekundant von *Boltzmann* auf. Heftig umstritten war in diesem Zusammenhang die Frage, ob der Übergang der Wärme von höherer zu tieferer Temperatur mit dem Herabsinken eines Gewichtes von größerer auf geringere Höhe verglichen werden kann. Nach *Planck* sind dies zwei unterschiedliche Prozesse. Mit dieser Meinung stand er aber im Widerspruch zu einer damals allgemein verbreiteten Ansicht, die beide Vorgänge als vergleichbar annahm (Bild 6).

Es war *Planck* nicht möglich, sich mit seiner Meinung bei den Fachkollegen durchzusetzen, obwohl er einen vollkommen zwingenden theoretischen Beweis erbringen konnte. Er schrieb später dazu in seiner wissenschaftlichen Selbstbiographie: »Daß *Boltzmann* in dem Kampf gegen *Ostwald* und die Energetiker sich schließlich durchsetzte, war für mich nach dem Gesagten eine Selbstverständlichkeit. Die grundsätzliche Verschiedenheit der Wärmeleitung von einem rein mechanischen Vorgang wurde allgemein anerkannt. Dabei hatte ich Gelegenheit, eine, wie ich glaube, bemerkenswerte Tatsache festzustellen. Eine neue wissenschaftliche Wahrheit pflegt sich nicht in der Weise durchzusetzen, daß ihre Gegner überzeugt werden und sich als belehrt erklären, sondern vielmehr dadurch, daß die Gegner allmählich aussterben und daß die heranwachsende Generation von vornherein mit der Wahrheit vertraut gemacht ist.«

Strahlen von warmen Körpern

Planck kannte demnach bestens die Zusammenhänge, als er 1896 mit den Untersuchungen zur Wärmestrahlung begann, die zu ganz erstaunlichen Resultaten führen sollten. Sie bildeten später die Grundlage für die Entwicklung von Atommodellen, mit deren Hilfe auch die bisher noch nicht einzuordnenden unsichtbaren Strahlen gedeutet werden könnten.

Geburt der Quantenvorstellung

Planck hatte sich das Ziel gestellt, eine Theorie der Wärmestrahlung auf der Grundlage der Elektrizitätslehre und der Thermodynamik zu entwickeln. Kurz zusammengefaßt und sehr vereinfacht ging es um folgendes: In welchen Farben und mit welcher Intensität strahlt ein Körper bei einer bestimmten Temperatur? Wie ändert sich diese Verteilung bei steigender oder sinkender Temperatur? Welches physikalische Modell ist geeignet, die Verhältnisse zu beschreiben?

Die hierzu in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt in Berlin zur gleichen Zeit ausgeführten Messungen gaben *Planck* dabei die Möglichkeit, seine theoretischen Erkenntnisse an der Erfahrung zu prüfen. Diese Messungen erfolgten nicht zufällig zu der Zeit, sie waren durch die Glühlampenindustrie angeregt worden, die sich damals stark entwickelte. Man benötigte physikalisch gesicherte Kenntnisse für die Herstellung von Glühlampen mit einer möglichst hohen Lichtausbeute.
Mit Hilfe des Kirchhoffschen Gesetzes der Hohlraumstrahlung und des Wienschen Strahlungsgesetzes entwickelte *Planck* Modellvorstellungen für die Energieverteilung im Normalspektrum der strahlenden Wärme. Bisher war die theoretische Begründung der gemessenen Spektren auf unüberwindliche Hindernisse gestoßen. Der erste Erfolg war eine auf halbempirischem Weg gefundene Formel, die als Plancksches Strahlungsgesetz bekannt wurde und mit den Meßdaten eine befriedigende Übereinstimmung zeigte. *Planck* schrieb dazu: »Aber selbst wenn man ihre absolut genaue Gültigkeit voraussetzt, würde die Strahlungsformel lediglich in der Bedeutung eines glücklich erratenen Gesetzes doch nur eine formale Bedeutung besitzen. Darum war ich von dem Tage ihrer Aufstellung an mit der Aufgabe beschäftigt, ihr einen wirklichen physikalischen Sinn zu verleihen.«

Erste Lösung

Durch Vergleich des Bekannten mit den Forderungen der Theorie rang er sich zu der unerhört kühnen Annahme durch, daß die Energie bei Strahlungsvorgängen nicht, wie bisher immer angenommen, stufenlos, sondern nur in gewissen kleinen Portionen, in »Quanten«, abgegeben und aufgenommen wird. Dazu führte *Planck* eine neue universelle Konstante ein. Da sie von der Dimension des Produktes von Energie und Zeit ist, nannte er sie das elementare Wirkungsquantum h.

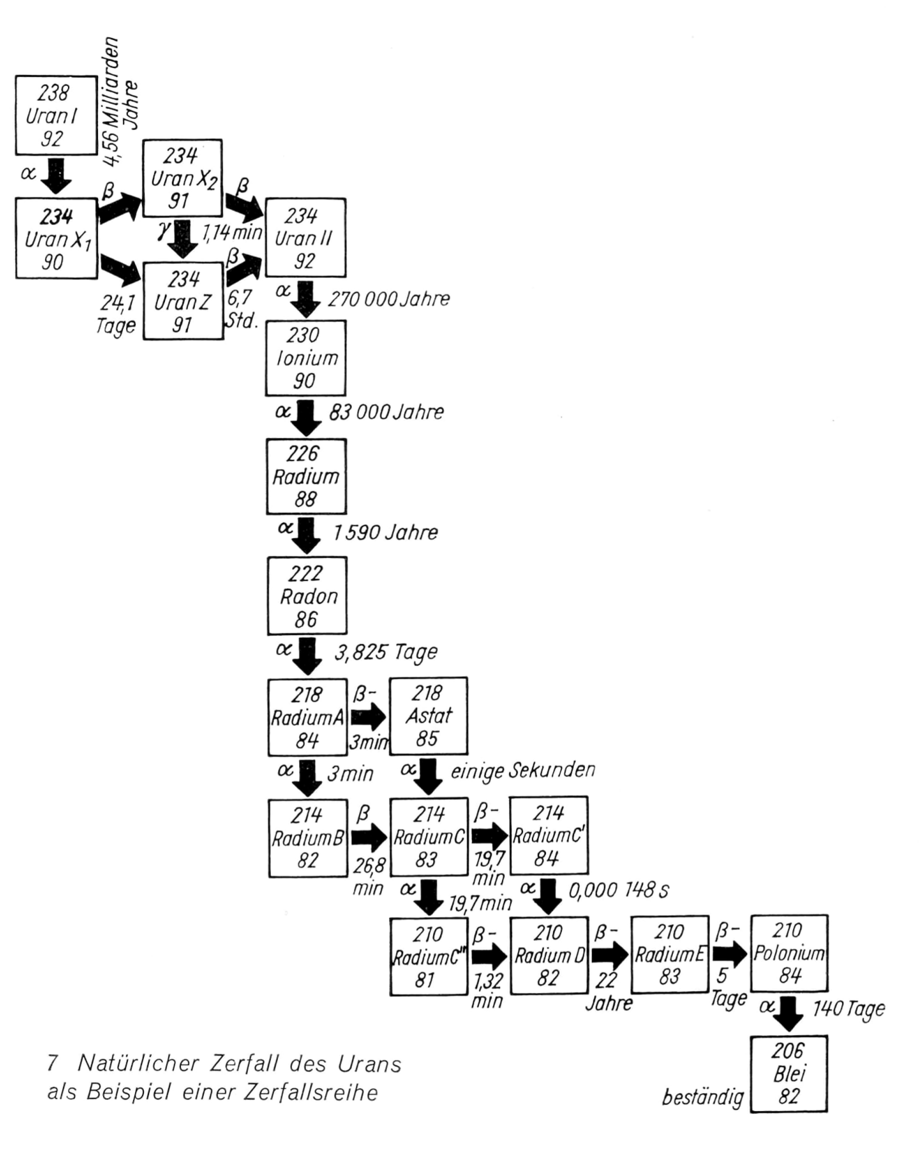
Energieaustausch in kleinen Portionen

Am 14. Dezember 1900 trug *Max Planck* in der Sitzung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft seine für die damalige Zeit umwälzenden Erkenntnisse vor. Doch weder er noch irgendein anderer begrüßte die neuen Vorstellungen mit Jubel. Es war ein zu starker Bruch mit den altgewohnten Prinzipien. *Planck* versuchte in den folgenden Jahren mit allen erlaubten Mitteln, das Wirkungsquantum doch noch in den Rahmen der klassischen Physik einzubauen, aber alle Bemühungen scheiterten. Danach hatte dann *Planck* keine Zweifel mehr, »daß das Wirkungsquantum in der Atomphysik eine fundamentale Rolle spielt und daß mit seinem Auftreten eine neue Epoche in der physikalischen Wissenschaft anhebt. Denn in ihm kündet sich etwas bis dahin Unerhörtes an, das berufen ist, unser physikalisches Denken, welches seit der Begründung der Infinitesimalrechnung durch *Leibniz* und *Newton* sich auf der Annahme der Stetigkeit aller kausalen Zusammenhänge aufbaut, von Grund aus umzugestalten«.
In der Tat erwies sich das elementare Wirkungsquantum in der Folgezeit als Schlüssel zum Verständnis vieler Eigenschaften der Atome. Der 14. Dezember 1900 wird deshalb allgemein als der Geburtstag der Atomphysik in ihrer Gesamtheit angesehen. Das wurde jedoch erst viel später klar.

Radioaktive Strahlen

Auf vielen anderen Gebieten stand man zu der Zeit ebenfalls noch ganz am Anfang. Die radioaktiven Strahlen gaben den Physikern Rätsel auf, die erwarten ließen, daß sich in den Atomen noch zahlreiche Geheimnisse verbergen. Bekannt war, daß die Strahlen nicht alle von derselben Art waren. Nach ihrer Durchdringungskraft unterschied man drei Arten und nannte sie einfach Alpha-, Beta- und Gammastrahlen, ehe man sich über ihre Natur im klaren war. Die Alphastrahlen haben in der Luft nur eine Reichweite von einigen Zentimetern und werden schon durch ein Blatt Papier aufgehalten. Die Betastrahlen können

Unterschiedliche Durchdringungsfähigkeit



7 *Natürlicher Zerfall des Urans als Beispiel einer Zerfallsreihe*

noch dünne Aluminiumfolie und die Gammastrahlen sogar Bleischichten von beträchtlicher Stärke durchdringen.

In der Mc-Gill-Universität der kanadischen Stadt Montreal experimentierten *E. Rutherford* und *F. Soddy* mit den radioaktiven Strahlen und sprachen sich für eine überraschende Deutung dieser Erscheinungen aus.

Was ist Radioaktivität?

Die Radioaktivität sei ein spontaner Umwandlungsprozeß, bei dem sich die Atome eines Elements in solche eines anderen Elements verwandeln. Das stand völlig im Gegensatz zu allen bisherigen Ansichten über die Atome, die insbesondere in der Chemie als unveränderliches und unzerstörbares Ganzes betrachtet wurden. Es wurde experimentell nachgewiesen, daß in der Mehrzahl der Fälle die radioaktiven Elemente Alpha- und Betastrahlen aussenden und dadurch eine bleibende Veränderung erleiden.

Verfolgen wir einmal diesen Umwandlungsprozeß: Das Atom eines radioaktiven Elements zerfällt in ein etwas leichteres Atom, dessen chemische Eigenschaften sich als vollkommen verschieden, verglichen mit denen des Mutterelements, erweisen. Es ist also ein Atom eines anderen Elements entstanden, das meistens

wieder radioaktiv ist. So kann sich dieser Prozeß viele Male fortsetzen. Das Endprodukt ist ein stabiles Bleiatom. Wir kennen heute vier solche natürlichen Zerfallsreihen, in denen jedes Element durch radioaktive Strahlung in ein anderes zerfällt und wieder ergänzt wird durch den Zerfall eines in der Reihe vor ihm stehenden schwereren Elements. Nicht ergänzt werden natürlich die Anfangsglieder der Ketten Uran 238, Thorium, Uran 235 und Neptunium (Bild 7).
Die Radioaktivität hat zur Folge, daß nach und nach alle Atome des radioaktiven Stoffes zerfallen. Zur Charakterisierung der Zeit, in der dieser Prozeß abläuft, führte man die mittlere Lebensdauer der Atome ein.

Lebensdauer der Strahler

Radioaktive Substanzen unterscheiden sich ganz außerordentlich in ihrer mittleren Lebensdauer. Von kleinsten Bruchteilen einer Sekunde bis zu Tausenden von Millionen Jahren sind alle Größenordnungen in der Folge der Generationen vertreten. Es gibt aber einen wesentlichen Unterschied zwischen der Lebenszeit eines Menschen und der eines radioaktiven Atoms. Beim Menschen hängt, einmal abgesehen von äußeren gewaltsamen Einwirkungen, die Wahrscheinlichkeit für das Weiterleben stark vom Lebensalter ab. Bisher gibt es noch kein wirksames Mittel gegen das Ablaufen der Lebensuhr. Bei den Atomen ist das anders. Haben sie z. B. eine mittlere Lebensdauer von 10 Tagen, dann haben die Atome, welche nach 10 Tagen noch existieren, genauso Aussicht, weitere 10 Tage zu leben, wie die Atome gleicher Art, die eben geboren worden sind. Der Zerfall eines Atoms scheint tatsächlich ein nur vom Zufall abhängiger Vorgang zu sein und nicht das Ergebnis dessen, daß irgendein Mechanismus im Innern des Atoms bis zu Ende abgelaufen ist. Deshalb kann man auch nie vorhersagen, wann ein bestimmtes Atom zerfällt.

Alphastrahlen

Den Forschern gelang es in mühevoller Kleinarbeit nach und nach einige Rätsel der Radioaktivität zu lösen. So wies *Rutherford* eindeutig nach, daß die Alphastrahlen aus Teilchen bestehen, die Atome des Edelgases Helium sind, welche zwei Elektronen verloren haben. Die sehr leichten Heliumatome, die nur viermal so schwer wie Wasserstoffatome sind, werden beim radioaktiven Zerfall mit so großer Geschwindigkeit herausgeschleudert, daß ihre Wirkung ausreicht, einzelne Alphateilchen nachzuweisen. Wählt man den Abstand zwischen einer radioaktiven Substanz und einem Leuchtschirm groß genug, daß nur in Abständen von Sekunden Alphateilchen auftreffen, werden die Einschläge durch einzelne Lichtblitze angezeigt. Hat sich der Beobachter an die Dunkelheit gewöhnt, kann er durch einfaches Zählen feststellen, wieviel Alphateilchen die Substanz aussendet. Damit ist ein Nachweis für die Realität der Atome möglich, auch wenn die Atome nicht direkt gesehen werden, sondern nur das Licht, das bei ihrem Aufprall entsteht.

Betastrahlen

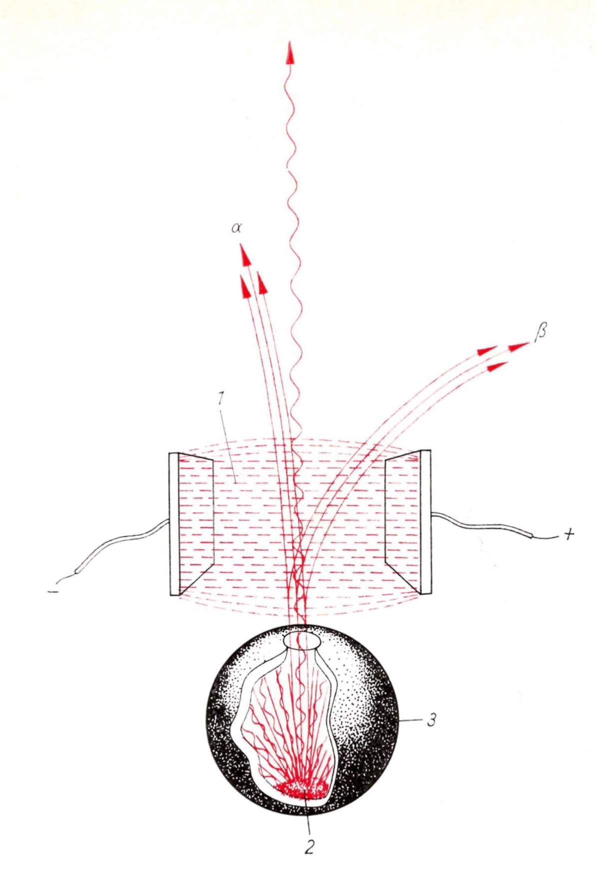
Die Betastrahlen wurden als Elektronen erkannt, die jedoch wesentlich schneller fliegen als Elektronen in der Form von Katodenstrahlen.

Gammastrahlen

Die Gammastrahlen erwiesen sich in den radioaktiven Zerfallsketten als eine Folgeerscheinung von anderen Strahlen. Nach Aussenden eines Alpha- oder Betateilchens bleibt das Atom meist in einem unstabilen Zustand zurück. Das Gefüge kommt dann durch Abgabe der überschüssigen Energie in Form von Gammastrahlen schnell wieder in Ordnung. Diese unterscheiden sich von den elektromagnetischen Röntgenstrahlen nur dadurch, daß sie auf eine andere Art entstehen und meist eine kürzere Wellenlänge haben.

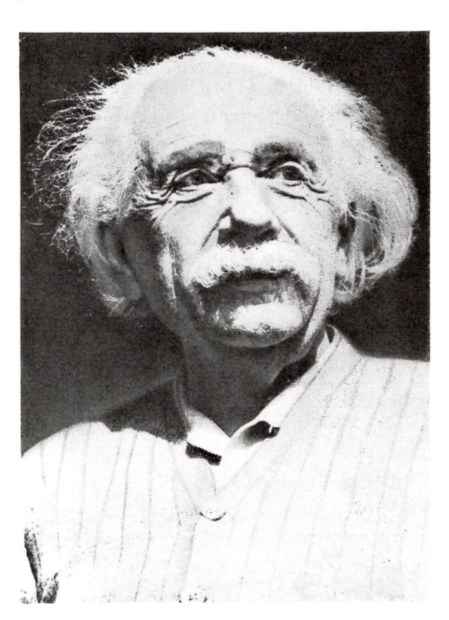
Die spezielle Relativitätstheorie

Die hohe Geschwindigkeit der Betateilchen brachte die Physiker auf eine ganz wesentliche Spur zu einer neuen Erkenntnis. Bei dem Versuch, die schnellen Betateilchen durch elektrische und magnetische Felder in eine Kurve zu zwingen, brauchte man eine größere Kraft, als man nach den Experimenten mit Katodenstrahlen erwartet hatte (Bild 8). Hieraus schloß man, daß die Masse des



8 Strahlung eines radioaktiven Präparats im elektrischen Feld
1 elektrisches Feld;
2 radioaktives Präparat; 3 Bleikapsel

9 Albert Einstein



Elektrons bei diesen hohen Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit größer ist als im Ruhezustand oder bei kleinen Geschwindigkeiten. Zum Beispiel fand man bei einer Geschwindigkeit von 3% unter der Lichtgeschwindigkeit eine Vergrößerung der Elektronenmasse um den Faktor 4.

Die Versuche, den Effekt der Massenvergrößerung zahlenmäßig zu berechnen, ergaben schließlich einen relativ einfachen mathematischen Ausdruck, der mit allen experimentellen Daten übereinstimmte. Darüber hinaus enthält er die Aussage, daß bei Erreichen der Lichtgeschwindigkeit die Masse des bewegten Körpers über alle Grenzen wächst und ihn daher keine endliche Kraft auf diese Geschwindigkeit bringen kann. Das ist eine der beiden, auf Erfahrung beruhenden Annahmen der speziellen Relativitätstheorie, die 1905 von *Albert Einstein* veröffentlicht wurde (Bild 9).

Der junge Einstein

Über *Einstein* zu jener Zeit berichtet *Infeld* folgendes: »Die Relativität wurde nicht nur durch das Genie *Einsteins* geboren. Doch *Einstein* bewirkte die Umwälzung, für die die Wissenschaft reif geworden war. Obwohl dazu auserwählt, diese Umwälzung zu führen, war er selbst der denkbar stillste Mensch. Er war Außenseiter, er gehörte nicht einmal zum Stand der Hochschullehrer. Damals, im Jahre 1905, war er ein junger Doktor der Philosophie, 26 Jahre alt, frisch verheiratet und Angestellter des Eidgenössischen Patentamtes in Bern. Er war schüchtern, gütig und liebenswürdig. Er studierte wenig, aber er dachte viel; er nahm von niemandem ein Dogma an. Ich glaube nicht, daß er jemals die Voraussetzungen für einen guten Angestellten hatte, aber die Schweiz stieß ihn nicht aus dem Staatsdienst aus. Man erlaubte ihm, zu denken und zu träumen und Abhandlungen zu schreiben, die das Antlitz der Welt verändern sollten.«

Für Interessenten sei hier die genaue Formulierung der beiden Annahmen ge-

nannt, aus denen allein durch logische Schlußfolgerungen *Einstein* die spezielle Relativitätstheorie entwickelte:

Einsteins große Tat

»1. Die Gesetze, nach denen sich die Zustände der physikalischen Systeme ändern, sind unabhängig davon, auf welches von zwei relativ zueinander in gleichförmiger Translationsbewegung befindlichen Koordinatensystemen diese Zustandsänderungen bezogen werden.
2. Jeder Lichtstrahl bewegt sich im ruhenden Koordinatensystem mit der bestimmten Geschwindigkeit c, unabhängig davon, ob dieser Lichtstrahl von einem ruhenden oder bewegten Körper emittiert ist.«

Masse und Energie sind gleichwertig

Es ist überraschend, daß die Relativitätstheorie ohne weitere Annahmen zu einem Resultat führt, welches einen unbegrenzten Ausblick für Wissenschaft und Technik eröffnen sollte. Der Schluß der zweiten Veröffentlichung Einsteins zu dieser Frage enthält nämlich die Formulierung des heute in der Form $E = m \cdot c^2$ bekannten Gesetzes von der Äquivalenz von Masse und Energie.
Die Physiker des 19. Jahrhunderts kannten zwei Erhaltungssätze: 1. das Gesetz der Erhaltung der Masse; 2. das Gesetz der Erhaltung der Energie. Energie war für sie etwas, das Arbeit verrichten kann, aber keine Masse hat. Die Relativitätstheorie führt zu einer völlig anderen Betrachtungsweise. Aus ihr kann man schließen, daß der Energie stets eine ganz bestimmte Masse zugeordnet ist und umgekehrt. Masse und Energie sind also äquivalent. Folglich gibt es nicht zwei unabhängige Erhaltungssätze. Es gibt nur einen Erhaltungssatz, nämlich das Prinzip der Erhaltung von Masse und Energie.

Nur ein Erhaltungssatz

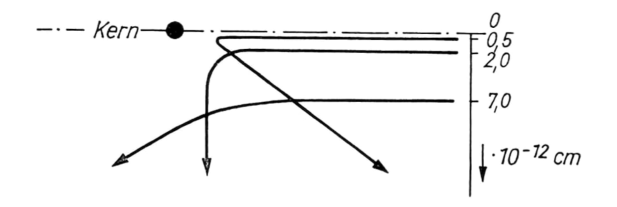
Die Energie wurde nur deshalb nicht mit der Masse in Verbindung gebracht, da das Masseäquivalent der Energien aus unserer Umgebung, das wir mit Hilfe der Gleichung $E = m \cdot c^2$ berechnen können, besonders klein ist. So hat beispielsweise die Wärmemenge, die man zur gänzlichen Verwandlung von tausend Tonnen Wasser in Dampf braucht, ein Masseäquivalent von nicht ganz einem Dreißigstel Gramm.
Durch die Relativitätstheorie wird zum ersten Mal erklärt, daß jede Masseeinheit einen enormen Energievorrat darstellt. Eine Erschließung dieser Energiequelle erschien aber nur rein theoretisch möglich. An eine praktische Anwendung dieser Erkenntnis war damals nicht im geringsten zu denken.
Das ist heute anders. Seit Hunderttausende von Menschen in Hiroshima starben, ist es anders. Die relativistische Beziehung zwischen Masse und Energie, die *Einstein* im Jahre 1905 fand, ist nicht mehr eine seltsame Laboratoriumserscheinung. Sie ist für uns alle eine Frage von Leben und Tod geworden.

Atommodelle

Die innere Struktur der Atome war, angeregt durch die Aufdeckung des Charakters der radioaktiven Strahlung, folgerichtig die nächste Stufe in der Erforschung der Mikrowelt. Als Baustein des Atoms war zuerst das elektrisch negativ geladene Elektron bekannt. Da aber Ladungen gleicher Art sich voneinander abstoßen, war es auf jeden Fall sicher, daß die Atome außer Elektronen noch irgend etwas anderes enthalten mußten. Es waren positiv geladene Bausteine zu erwarten, welche die Ladung der Elektronen neutralisieren. Bei den Untersuchungen zeigte sich, daß diese Bausteine ungefähr die Masse eines Wasserstoffatoms haben. *Rutherford* taufte diese positiven Teilchen Protonen.

Aufbau der Atome

Bisher ist es noch in keinem Experiment gelungen, Anzeichen für die Aufsplitterung eines Elektrons oder Protons zu finden, so daß man deren Ladungen als kleinste Einheit ansehen kann. Da das Wasserstoffatom neutral ist, muß die Ladung des Protons seiner Größe nach gleich der des Elektrons sein, aber von entgegengesetztem Vorzeichen. Auch jedes andere neutrale Atom muß demzufolge aus der gleichen Anzahl von Elektronen und Protonen zusammen-



10 Streuung von Alphateilchen am Atomkern

gesetzt sein. Nach den letzten Messungen ist die Masse des Elektrons etwa 1844mal kleiner als die des Protons.

Wie kann man nun etwas über die Anordnung der Bausteine und über die Kräfte im Innern des Atoms erfahren? Diese Frage beschäftigt die Physiker seit vielen Jahrzehnten und ist auch heute noch nicht völlig gelöst. Die erste Theorie stellte 1911 *Rutherford* nach Experimenten von *Geiger* und *Marsden* auf. Diese hatten von den Alphastrahlen einer radioaktiven Substanz ein enges Strahlenbündel ausgeblendet und auf ein dünnes Goldplättchen treffen lassen. Einige Zentimeter hinter dem Blättchen konnte auf einem Leuchtschirm das Auftreffen der Teilchen beobachtet werden. Die meisten Teilchen wurden nur geringfügig aus der ursprünglichen Richtung abgelenkt. Bei einigen war die Abweichung aber überraschend groß, teilweise wurden sie sogar von der Goldfolie reflektiert. Wie läßt sich das erklären?

Billard mit Alphateilchen

Die im Atom vermuteten Elektronen scheiden wegen ihrer zu geringen Masse als Stoßpartner für die zurückprallenden Alphateilchen aus. Das kann man an jedem Billardtisch nachprüfen, wenn man eine Kugel etwa durch einen Tischtennisball ersetzt. Es müßte daher eine wesentlich größere Masse die Reflexion der Alphateilchen bewirken. *Rutherford* machte deshalb versuchsweise die Annahme, daß alle Protonen zu einer Masse zusammengeballt seien, die er den Kern nannte. Es war bekannt, daß ein Goldatom eine nahezu 50mal so große Masse hat wie ein Alphateilchen. Damit wäre der geeignet große Gegenpol für die Alphateilchen gefunden.

Atom hat einen Kern

Es war eine naheliegende Möglichkeit, daß zwischen Geschoß und Kern auch elektrische Kräfte wirken. Da beide positiv geladen sind, müßten sie sich mit einer Kraft abstoßen, die dem Quadrat ihres Abstandes umgekehrt proportional ist. Die klassische Physik erlaubt, aus der Winkelverteilung der gestreuten Teilchen den minimalen Abstand vom Streuzentrum zu berechnen (Bild 10). Danach geht die Annäherung bis zu Abständen von 10^{-14} m. Dieser Abstand ist aber viel geringer als der Radius der Atome, den man mit Hilfe der kinetischen Gastheorie berechnen kann (10^{-10}m).

Rutherford zog hieraus den Schluß, daß die Ergebnisse seine Annahme bestätigen: Das Innere des Atoms muß weitgehend leer sein, und der überwiegende Anteil der Masse des Atoms ist in einem positiven Kern vereinigt, der auf keinen Fall größer als 10^{-14}m sein kann. Die Protonenzahl wurde als Kernladung bezeichnet und stimmt innerhalb der Fehlergrenzen der Versuche mit der Ordnungszahl im Periodensystem der Elemente überein. Damit war eine Erklärung für die bedeutende Rolle der Ordnungszahl im Periodensystem gefunden worden.

Kernladung

Wo haben aber nun die Elektronen ihren Platz im Atom? Einige der negativ geladenen Elektronen vermutete man im Kern als eine Art Kitt für die Neutralisierung der abstoßenden Kräfte der positiv geladenen Protonen. Je mehr jedoch die Kenntnis von den Eigenschaften der Elektronen wuchs, um so schwieriger wurde es einzusehen, wie sie im Kern untergebracht sein könnten.

Rutherfords Modell

Trotz vieler Unklarheiten gab es einen großen Fortschritt: *Rutherford* schlug das erste Modell vom Bau der Atome vor. Danach sollten die Atomkerne, deren Abmessungen nicht größer als 10^{-14}m sein sollten, in einem Abstand von etwa 10^{-10}m von Elektronen umkreist werden, wie die Sonne von ihren Planeten. Bei

einem elektrisch neutralen Atom ist die Zahl der kreisenden Elektronen so groß, daß die Summe ihrer negativen Ladungen der positiven Kernladung gleich ist.
Dieses Modell widerspricht aber in einem wesentlichen Punkt der klassischen Elektrodynamik. Ein Elektron, das einen Kern umkreist, ist nach der klassischen Theorie von einem ständig wechselnden elektromagnetischen Feld umgeben und strahlt pausenlos Energie in Form von Licht aus. Durch den damit verbundenen dauernden Energieverlust bedingt, müßte es schließlich in den Kern fallen, was offensichtlich nicht das Schicksal der Elektronen ist. Es war noch ein ganz entscheidender Schritt notwendig, um das Atommodell von *Rutherford* mit der Erfahrung in Übereinstimmung zu bringen. Dieser Schritt gelang 1912 dem dänischen Physiker *Niels Bohr*.

Abstürzendes Elektron?

Bohr hatte in Manchester, in *Rutherfords* Laboratorium, die ganze Problematik kennengelernt und viel mit *Rutherford* über solche Fragen gesprochen. Unter radikaler Abkehr von den Vorstellungen der klassischen Physik wandte *Bohr* das Gedankengut der seit 1900 entwickelten Quantentheorie auf das Atommodell an. Die Bahnen der Elektronen, die den Kern umkreisen, sollten durch zusätzliche Forderungen festgelegt werden, die mit der Physik im alten Sinne nichts zu tun haben. Dadurch sollte die merkwürdige Stabilität der Materie gegenüber äußeren Einwirkungen erklärt werden. Nach diesen Forderungen, auch Quantenbedingungen genannt, gibt es bei den kreisenden Elektronen nur ganz bestimmte Energiestufen. Die Elektronen können sich nur auf ganz bestimmten stationären Bahnen aufhalten und nicht auf jeder der unendlich vielen Bahnen, welche die klassische Mechanik zuläßt. Auf diesen stationären Bahnen sollen die Elektronen, im Gegensatz zur klassischen Elektrodynamik, keine Energie, d. h. kein Licht, ausstrahlen. Eine Ausstrahlung erfolgt nur dann, wenn ein Elektron sprunghaft von einer Bahn (Energiestufe) auf eine Bahn mit geringerer Energie überwechselt, wenn es also einen Quantensprung ausführt.

Modell von Bohr

Die zu einer Elektronenbahn gehörende Energiestufe wird leichter vorstellbar, wenn man in Analogie zum Atommodell die Bewegung eines Satelliten um die Erde betrachtet. Der Satellit bewegt sich auf einer ganz bestimmten Bahn mit einer ganz bestimmten Geschwindigkeit, die von seinem Abstand von der Erde abhängt. Damit der Flugkörper weder auf die Erde fällt noch in den Kosmos fliegt, muß zwischen dem Radius seiner Bahn und der Geschwindigkeit seiner Bewegung ein bestimmtes Verhältnis bestehen. Es drückt die erforderliche Gleichheit zwischen der den Körper nach außen drängenden Zentrifugalkraft und der Anziehungskraft der Erde aus. Der Drehimpuls des Satelliten, das ist das Produkt aus seiner Masse, der Geschwindigkeit und dem Bahnradius, kann beliebige Werte annehmen.
Bohrs Behauptung läuft darauf hinaus, daß im Atom der Drehimpuls des kreisenden Elektrons nur ganzzahlige Vielfache der vom Planckschen Wirkungsquantum h abgeleiteten Größe $\hbar = h/2\pi$ annehmen kann. Damit ist die Verbindung zur Quantentheorie hergestellt. Diese Bedingung, zusammen mit der vorher genannten Gleichgewichtsbeziehung für die Bahnbewegung, liefert ohne Schwierigkeiten die Energiewerte und die Radien der stationären Bahnen der Elektronen. Der auf diese Weise berechnete Radius des Wasserstoffatoms von $0{,}53 \cdot 10^{-10}$m stimmt recht gut mit der Voraussage der kinetischen Gastheorie überein.

Verbindung zur Quantentheorie

Das Ganze erschien den Physikern ungeheuer mystisch. Man hätte die Vorstellungen *Bohrs* wohl überhaupt nicht ernst genommen, wenn man nicht damit eine Vielzahl von experimentellen Daten hätte erklären können, die man über die Spektrallinien verschiedener chemischer Elemente gesammelt hatte. Gemeint sind solche Leuchterscheinungen, wie sie sicher jeder vom Natrium schon wahrgenommen hat, wenn Kochsalz (Natriumchlorid) in die Flamme des Gasherdes gerät und diese gelb färbt.
Eine glänzende Bestätigung des Bohrschen Atommodells lieferten 1913 die Franck-Hertzschen-Elektronenstoßversuche. Die Experimente zeigten, daß die

Experimentelle Bestätigung

Atome beim Zusammenstoß mit Elektronen nur bestimmte Energiequanten aufnehmen können. Das war eine eindrucksvolle Bestätigung der Deutung der Spektralterme als Energiewerte für die stationären Zustände des Atoms. Für diese hervorragende Leistung, die einen wesentlichen Beitrag zu den Grundlagen der modernen Atomphysik darstellt, wurden *James Franck* und *Gustav Hertz* mit dem Nobelpreis für Physik des Jahres 1925 gewürdigt.

Die Art von *Bohrs* Vorgehen blieb trotzdem etwas unverständlich. Die Elektronenbahn wurde nach der klassischen Newtonschen Mechanik berechnet, dann wurde ihr aber durch die Quantenbedingungen eine Stabilität gegeben, die sie nach der klassischen Theorie nie haben dürfte. Das sprunghafte Überwechseln von einer Bahn zur anderen bei der Abstrahlung von Licht erschien völlig undurchsichtig. *Bohr* äußerte dem jungen *Heisenberg* gegenüber, der ihm ähnliche Bedenken vorgetragen hatte, daß der Ausgangspunkt des Modells nicht der Gedanke war, daß das Atom ein Planetensystem im kleinen sei und daß man hier die Gesetze der Astronomie anwenden könnte. Für ihn sei das Wesentliche die Stabilität der Materie, die ja vom Standpunkt der bisherigen Physik ein reines Wunder sei (Bild 11).

Atom ist kein Planetensystem

Aus Gesprächen zwischen *Bohr* und *Heisenberg*, die vom letzteren aufgezeichnet wurden, soll hier eine längere Passage wiedergegeben werden, da sie uns mit großer Anschaulichkeit einen Einblick in die Schwierigkeiten der Physiker bei der Erforschung der inneren Struktur der Atome vermittelt.

Bohr äußerte, daß seine Theorie versuchen sollte, den Zusammenhang zwischen allen bis dahin gewonnenen Erfahrungen über den Bau des Atoms herzustellen. »Nun ist das aber eigentlich eine ganz hoffnungslose Aufgabe, eine Aufgabe ganz anderer Art, als wir sie sonst in der Wissenschaft vorfinden. Denn in der bisherigen Physik oder in jeder anderen Naturwissenschaft konnte man, wenn man ein neues Phänomen erklären wollte, unter Benutzung der vorhandenen Begriffe und Methoden versuchen, das neue Phänomen auf die schon bekannten Erscheinungen oder Gesetze zurückzuführen. In der Atomphysik aber wissen wir schon, daß die bisherigen Begriffe dazu sicher nicht ausreichen. Wegen der Stabilität der Materie kann die Newtonsche Physik im Innern des Atoms nicht richtig sein, sie kann bestenfalls gelegentlich einen Anhaltspunkt geben. Und daher wird es auch keine anschauliche Beschreibung der Struktur des Atoms geben können, da eine solche – eben weil sie anschaulich sein sollte – sich der Begriffe der klassischen Physik bedienen müßte, die aber das Geschehen nicht mehr ergreifen. Sie verstehen, daß man mit einer solchen Theorie eigentlich etwas ganz Unmögliches versucht. Denn wir sollen etwas über die Struktur des Atomes aussagen, aber wir besitzen keine Sprache, mit der wir uns verständlich machen können. Wir sind also gewissermaßen in der Lage eines Seefahrers, der in ein fernes Land verschlagen ist, in dem nicht nur die Lebensbedingungen ganz andere sind, als er sie aus seiner Heimat kennt, sondern in dem auch die Sprache der dort lebenden Menschen ihm völlig fremd ist. Er ist auf Verständigung angewiesen, aber er besitzt keinerlei Mittel zur Verständigung. In einer solchen Lage kann eine Theorie überhaupt nicht »erklären« in dem Sinn, wie das sonst in der Wissenschaft üblich ist. Es handelt sich darum, Zusammenhänge aufzuzeigen und sich behutsam voranzutasten.«

Sprache der Atome

Heisenberg fragte zurück: »Was bedeuten aber dann die Bilder von den Atomen, die Sie in den letzten Tagen in Ihren Vorlesungen gezeigt und besprochen haben und für die Sie auch Gründe angegeben haben? Wie sind die gemeint?«

Bohrs Bilder von Atomen

»Diese Bilder«, antwortete *Bohr*, »sind ja aus Erfahrungen erschlossen, oder, wenn Sie so wollen, erraten, nicht aus irgendwelchen theoretischen Berechnungen gewonnen. Ich hoffe, daß diese Bilder die Struktur der Atome so gut beschreiben, aber eben auch nur so gut beschreiben, wie dies in der anschaulichen Sprache der klassischen Physik möglich ist. Wir müssen uns darüber klar sein, daß die Sprache hier nur ähnlich gebraucht werden kann wie in der Dichtung, in der es ja auch nicht darum geht, Sachverhalte präzis darzustellen, sondern



11 *Werner Heisenberg*

darum, Bilder im Bewußtsein des Hörers zu erzeugen und gedankliche Verbindungen herzustellen.«
»Aber wie sollen dann eigentlich Fortschritte erzielt werden? Schließlich soll die Physik doch eine exakte Wissenschaft sein.« »Wir müssen erwarten«, meinte *Bohr*, »daß die Paradoxien der Quantentheorie, die unverständlichen Züge, die mit der Stabilität der Materie zusammenhängen, mit jeder neuen Erfahrung in immer schärferes Licht treten. Wenn dies geschieht, so kann man hoffen, daß sich im Laufe der Zeit neue Begriffe bilden, mit denen wir auch die unanschaulichen Vorgänge im Atom irgendwie ergreifen können. Aber davon sind wir noch weit entfernt.«
Die Entwicklung der Atomphysik verlief in den folgenden Jahren so, wie es *Bohr* vorausgesagt hatte. Es gelang nicht, die Schwierigkeiten zu mildern oder zu beseitigen, die einem Verständnis der Atome und ihrer Stabilität entgegenstanden. Die Experimentatoren entdeckten immer wieder Erscheinungen, die mit den bisherigen Erkenntnissen nicht in Übereinstimmung zu bringen waren. So fand der amerikanische Physiker *Compton*, daß die Röntgenstrahlung bei der Streuung an Elektronen ihre Frequenz ändert. Dieser Umstand konnte nur so erklärt werden, daß man die Röntgenstrahlen als kleine Korpuskeln oder Energiepakete auffaßt. Bis dahin war man vom Wellencharakter der Röntgenstrahlung überzeugt gewesen, da sich diese auf die experimentellen Ergebnisse der Beugung an Kristallgittern stützen konnte.

Comptoneffekt

Mit Hilfe des Bohrschen Atommodells war es möglich, die Atomspektren des Wasserstoffs unter Verwendung einiger experimentell bestimmbarer Größen zu berechnen. Doch als man feststellte, daß bestimmte Spektrallinien eine Feinstruktur aufweisen, d. h., daß sich jede Linie aus mehreren Einzellinien zusammensetzt, wurde eine Änderung der Bohrschen Theorie notwendig. *Sommerfeld* verallgemeinerte das Atommodell, indem er nicht nur kreisförmige, sondern allgemein elliptische Bahnen für die Bewegung der Elektronen um den Atomkern zuließ und dafür eine neue Quantenzahl einführte.

Modell von Sommerfeld

Es zeigte sich jedoch, daß selbst zwei Quantenzahlen nicht alle Besonderheiten der Spektren erklären konnten. Bringt man z. B. ein Atom in ein Magnetfeld, dann spalten sich seine Spektrallinien ganz anders auf, als es die bisherige Theorie voraussagte. Die entsprechenden experimentellen Ergebnisse waren schon 1896 durch *Pieter Zeemann* gesichert worden. Nach den Erkenntnissen von *Bohr* und

Sommerfeld wurde diese Erscheinung folgendermaßen gedeutet: Ein Elektron verhält sich auf einer geschlossenen Bahn im Atom ähnlich wie eine Stromschleife in der Wicklung eines Elektromotors. Ebenso wie eine derartige Schleife bei Stromdurchgang, beginnt auch die Elektronenbahn im Magnetfeld eine Drehbewegung auszuführen. Die Quantentheorie läßt jedoch, bezogen auf die Richtung des Magnetfeldes, nur ganz bestimmte räumliche Lagen der Elektronenbahn im Atom zu, die durch eine dritte Quantenzahl gekennzeichnet werden können. Damit konnten weitere experimentelle Ergebnisse gedeutet werden. Trotzdem blieben immer noch Fragen offen.

Dritte Quantenzahl

Beispielweise war das Problem, daß auch ohne Magnetfeld eine Spektrallinie des Natriums aus zwei eng beieinanderliegenden Komponenten besteht, bisher ungelöst. Im Jahre 1924 brachte *Wolfgang Pauli* den experimentellen Befund mit der Theorie durch eine vierte Quantenzahl in Übereinstimmung, die nur die beiden Werte +1/2 und —1/2 annehmen sollte. Ein anschauliches Modell fanden dafür 1927 *George Eugene Uhlenbeck* und *Samuel Abraham Goudsmit*. Sie nahmen an, daß sich das Elektron um seine eigene Achse dreht und einen inneren Drehimpuls, den sogenannten Elektronenspin, aufweist, für den die vierte Quantenzahl die Werte +1/2 bzw. —1/2 hat, die den beiden möglichen Drehrichtungen entsprechen.

Elektronenspin

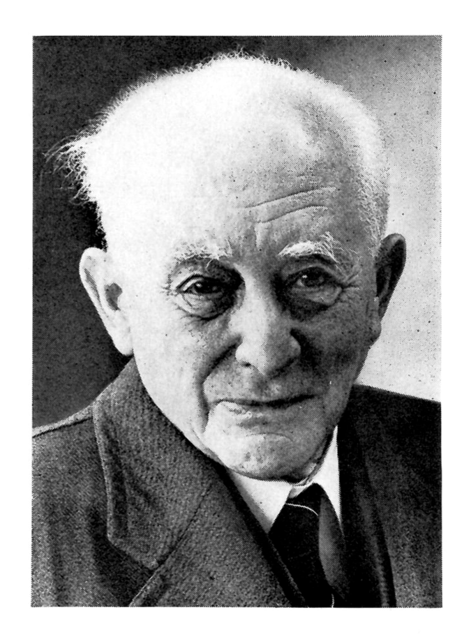
Durch das Einarbeiten der neuen Quantenzahlen wurde das Bohrsche Atommodell immer komplizierter und verlor seine ursprüngliche Eleganz. Von dem entstandenen formalen Atommodell wurde nur eines gefordert: eine richtige Systematik der gemessenen Atomspektren. Im Jahre 1925 war ein großer Teil der Arbeit geschafft und eine beträchtliche Zahl von Spektrallinien geordnet. So konnte das erste, wenn auch vorläufig noch recht grobe Bild von der inneren Struktur des Atoms entworfen werden.

Schalenmodell des Atoms

Zunächst denkt man sich, in Anlehnung an das Bohrsche Atommodell, die Elektronenhülle aus Schalen aufgebaut, die durch die sogenannten Hauptquantenzahlen bestimmt sind. Diese Schalen bezeichnet man, von innen angefangen, der Reihenfolge nach als K-, L-, M-, N-Schale usw. Beim Auffüllen dieser Schalen mit Elektronen muß das 1925 von *Pauli* gefundene Ausschließungsprinzip berücksichtigt werden. Es besagt, daß sich in einem Atom alle Elektronen in verschiedenen Zuständen befinden und sich mindestens in einer der vier Quantenzahlen unterscheiden müssen. Die auf dieser Grundlage geordneten Elektronen ergeben ein formales Atommodell, das trotz seiner Kompliziertheit die grundlegenden Eigenschaften der Atome richtig beschreibt.
Es wurde offensichtlich, daß die aus der früheren Physik in den Bereich der Atome übertragenen Begriffe und Bilder nicht zu streng beurteilt werden durften. Sie waren hier meist nur halb richtig und halb falsch. Unter Ausnutzung dieser Erkenntnis wurden viele mathematische Formulierungen einfach erraten.

Schulen der Atomforschung

Es gab zu der Zeit mehrere Institute, in denen man sich der Atomforschung besonders widmete. Neben Kopenhagen, wo *Niels Bohr* die neue Atomtheorie begründete, und München, wo *Arnold Sommerfeld* mit seinem Werk über Atombau und Spektrallinien eine Schule für die neue Atomwissenschaft eröffnet hatte, wurde nach 1921 durch das Wirken von *Max Born* und *James Franck* auch Göttingen zu einem Zentrum der neu entstehenden Disziplin.
Born fesselte seine jungen Mitarbeiter, die er aus verschiedenen Ländern in seinem Institut versammelt hatte, vor allem dadurch, daß er sie noch skeptischer gegen den damaligen Zustand der Bohr-Sommerfeldschen Theorie des Atombaus machte und in seinen Schülern das Gefühl zu wecken verstand, es sei hier noch die wichtigste Arbeit zu leisten. In München hoffte man noch, daß man mit der alten Newtonschen Mechanik, ergänzt durch die Quantenbedingungen, dem Atom beikommen könnte. *Born* verbreitete dagegen ganz systematisch die



12 Max Born

Überzeugung, daß eine Neuformulierung der Mechanik gefunden werden müsse (Bild 12).

An den Seminaren, die oft am Abend im kleinsten Kreis im Wohnzimmer der Bornschen Villa stattfanden, nahmen damals solche hoffnungsvollen und begabten Physiker wie *Heisenberg, Pauli, Fermi, Hund* und *Jordan* teil. In den Diskussionen wurde der Boden für die neue Atomphysik bereitet, und schon im Jahre 1924 gehörte hier das Wort Quantenmechanik zu den Begriffen, durch die das Ziel der Bemühungen wie selbstverständlich charakterisiert wurde.

Heisenberg verwirft die Bahnen

Als *Heisenberg* der Versuch mißlang, die richtigen Formeln für die Intensitäten der Linien im Wasserstoffspektrum zu erraten, festigte sich in ihm die Vorstellung, daß man gar nicht nach den Bahnen im Atom fragen dürfe, sondern daß die Gesamtheit der Schwingungszahlen und der die Intensität der Linien bestimmenden Größen als ein vollwertiger Ersatz der Bahnen gelten könnte. Das sind ja auch diejenigen Größen, die man direkt beobachten kann. Es schwebte ihm eine mathematische Beschreibung vor, in welcher die Bedingungen in einer Art Tabellenform, der sogenannten Energiematrix, formuliert werden sollten. Da das Wasserstoffatom sich vorerst als zu kompliziert erwies, versuchte er es zunächst an einem mathematisch einfacheren mechanischen System. Dazu bot sich das schwingende Pendel an.

Erfolg einer Reise

1925 besuchte *Heisenberg* die Insel Helgoland, um in der Seeluft sein Heufieber auszukurieren. Fernab vom Universitätsbetrieb kam er schneller mit der Lösung der physikalischen Probleme voran, als es sonst in Göttingen möglich gewesen wäre. Es gelang ihm in kurzer Zeit, ein neues mathematisches Schema für die Quantenmechanik zu entwickeln. Es mußte selbstverständlich noch geprüft werden, ob in diesem Schema der Erhaltungssatz der Energie noch gilt, ohne den alles wertlos gewesen wäre. Doch ohne weiteres Zutun, sozusagen zwanglos, erwies sich der Energiesatz in allen Gliedern als gültig. So bestand an per mathematischen Widerspruchsfreiheit und Geschlossenheit der damit angedeuteten Quantenmechanik kein Zweifel mehr. *Heisenberg* erinnerte sich, daß er damals das Gefühl hatte, »durch die Oberfläche der atomaren Erscheinungen hindurch auf einen tief darunter liegenden Grund von merkwürdiger innerer Schönheit zu schauen.«

Gemeinsames Ziel: Quantenmechanik

In Göttingen stellte *Born* seine überragenden mathematischen Kenntnisse über die Methoden der modernen linearen Algebra, der Matrizenrechnung und der

Transformationstheorie für die Darstellung der neuartigen Formulierung der physikalischen Zusammenhänge zur Verfügung. Der junge Engländer *Dirac* entwickelte in Cambridge eigene mathematische Methoden zur Lösung der Probleme. So war schon nach wenigen Monaten konzentrierter Arbeit vieler Physiker ein geschlossenes, zusammenhängendes mathematisches Modell erarbeitet, von dem man hoffen konnte, daß es die Gesamtheit aller beobachtbaren Erscheinungen – als der einzig zuverlässigen Wissensgrundlage der Physik –, aber auch nur diese, richtig und vollständig beschreiben würde.

Modelle der Natur

Forderungen an ein Modell

In welchem Sinne beurteilen wir eine Modellvorstellung als richtig oder falsch? Es liegt in der Natur von uns Menschen, daß wir nicht ohne eine Anschauung der Dinge auskommen. Wir brauchen deshalb ein vorstellbares, mechanisches Modell auch der nichtmechanischen Vorgänge, wie es die elektrischen, optischen und kernphysikalischen Vorgänge sind. Dieses Modell beschreiben wir dann durch dieselben Gleichungen, wie sie auch mit den nichtmechanischen Vorgängen verknüpft werden müssen. Die Gleichungen liefern nun Aussagen über die Wirkung der Erscheinungen auf unsere Meßinstrumente und auch letzten Endes auf unsere menschlichen Sinnesorgane. Ein Modell wird nur dann von uns als richtig angesehen, wenn diese Aussagen mit dem experimentell festgestellten Befund übereinstimmen, wenn also Messung und Rechnung in ihren Fehlergrenzen die gleichen Resultate liefern.

Ein Modell genügt nicht

Wir stehen aber z. B. beim Licht vor der Tatsache, daß ein Modell auf keine Weise zur Deutung aller Vorgänge ausreicht, sondern daß dazu zwei völlig verschiedene Modelle benötigt werden. Die Wellenoptik ist immer dann zuständig, wenn es um die Ausbreitung des Lichts im Raum geht. Das 1905 von *Einstein* aufgestellte Quantenmodell gibt uns Auskunft über die Entstehung des Lichts und seine Wechselwirkung mit Atomen und Molekülen. Nach *Einstein,* der von *Plancks* Arbeiten im Jahre 1900 ausging, ist das Licht eine Folge von kleinsten Teilchen, von Photonen; es gleicht einer Gewehrsalve. Die Energie jedes Teilchens ist der Wellenlänge des Lichts umgekehrt proportional, oder anders ausgedrückt, je größer die Wellenlänge ist, um so geringer ist die Energie. Mit dieser Theorie gelang es *Einstein* als erstem, den Fotoeffekt zu erklären, d. h. die Tatsache, daß Licht von einer bestimmten Wellenlänge ab aus Metalloberflächen Elektronen freisetzt. Die kinetische Energie der davonfliegenden Elektronen ist dabei von der Lichtintensität unabhängig und wächst streng linear mit der Schwingungszahl des Lichts. Alle diese Fakten standen völlig im Widerspruch zur Wellentheorie des Lichts.

Fotoeffekt

Folgen wir *Einsteins* Annahme, dann wird ein Teil der Energie der als Lichtkugeln anzusprechenden Photonen dafür verbraucht, das Elektron vom Atom zu trennen. Der übrige Teil dient zur Beschleunigung der Elektronen. Diese einfache, aber geniale Gedankenführung *Einsteins* reicht vollständig zur Deutung der Experimente aus, und *Einstein* erhielt dafür im Jahre 1921 den Nobelpreis.
Trotzdem ist aber das Licht weder eine Welle noch ein Teilchen, sondern etwas, das einer anschaulichen Beschreibung unzugänglich ist. Man spricht darum von einem Dualismus von Welle und Teilchen.

Alles hat eine Wellenlänge

Im Jahre 1924 kam *Louis de Broglie* auf den Gedanken, auch für Atome und Elektronen ein weiteres Modell einzuführen. Er setzte neben das vertraute Teilchenbild ein Wellenbild der Atome und Elektronen und gab damit den Anstoß zu überraschenden Entdeckungen. Nach dieser Vorstellung müßte man auch den Körpern unserer täglichen Umgebung eine Wellenlänge zuordnen. Diese ist aber nach der Theorie so außerordentlich kurz, daß wir von einer Wellennatur der Gegenstände nichts bemerken. Doch die Wellenlängen der Elektronen, dieser winzigen Elementarteilchen, kommen in die gleiche Größen-

ordnung wie die Röntgenwellenlängen. Diese Hypothese wurde wenig später experimentell durch die Beugung von Elektronenwellen an Kristallen bestätigt.
Der Wiener Physiker *Erwin Schrödinger* entwickelte den Gedanken von *de Broglie* weiter und formulierte 1926 in einer Wellengleichung das Gesetz für die Ausbreitung von Materiewellen. Wesentlich war, daß er auch die mathematische Gleichwertigkeit der Quantenmechanik und der Wellenmechanik nachweisen konnte. Danach handelt es sich bei beiden um zwei verschiedene mathematische Formulierungen des gleichen Sachverhalts. *Born* zeigte dann, daß man die Schrödingerschen Wellen auch statistisch deuten könne, daß ihre Intensität als Maß für die Wahrscheinlichkeit aufgefaßt werden müsse, an der betreffenden Stelle ein Teilchen vorzufinden. Das war ein äußerst wichtiger Hinweis, denn mit dieser Interpretation haben die Lösungen der Wellengleichung in der Mikrowelt denselben Doppelcharakter (Welle und Teilchen), den die Elementarteilchen in den Experimenten zeigen, und stimmen außerdem in der Makrowelt mit den Lösungen der gewöhnlichen Mechanik überein.

Zwei Wege zum gleichen Ziel

Das ist genau die Qualität, die man von einer physikalischen Beschreibung erwartet. Ein großer Erfolg war außerdem, daß die Gleichung alle grundlegenden Ergebnisse für die Elektronen eines Atoms auch ohne alle die Postulate und Auswahlregeln der Bohrschen Theorie lieferte.
Der statistische Charakter der Naturgesetze ist dann noch lange Zeit der Stein des Anstoßes bei der Anerkennung der neuen Theorie gewesen. »Gott würfelt nicht« war ein Grundsatz, an dem *Einstein* unerschütterlich festhielt und sich deshalb mit *Born* nicht einigen konnte. Die spätere Entwicklung hat aber *Borns* Ansichten recht gegeben.

Elektronen im Nebel

Ein Versuchsergebnis konnte aber nach wie vor nicht gedeutet werden. Das war eine so einfache Erscheinung wie die Bahn eines Elektrons in der Nebelkammer. Diese von *H. A. Wilson* entwickelte Kammer ist ein ungemein sinnreiches und wichtiges Gerät zur Untersuchung aller durchdringenden Teilchenstrahlungen. Die Bahnen einzelner Teilchen können dadurch unmittelbar sichtbar gemacht werden, daß sie längs ihres Weges in der Luft Ionen bilden und daß diese Ionen kondensationsfördernd auf Wasserdampf wirken, mit dem die Luft der Kammer nahezu gesättigt ist. Die Nebelspur kann dann fotografiert werden.
Es gelang jedoch nicht, die Bahn eines auf diese Weise registrierten Elektrons mit dem mathematischen Formalismus der Quanten- oder Wellenmechanik in Einklang zu bringen. In der Quantenmechanik verwendete man den Bahnbegriff gar nicht. In der Wellenmechanik war zwar ein enger, gerichteter Materiestrahl möglich, der sich aber nach der Theorie allmählich so ausweiten müßte, daß der Durchmesser wesentlich größer sein würde als der eines Elektrons.

Es »klart auf«

Heisenberg gelang es, den Sachverhalt aufzuklären. Entscheidend war, daß er die Frage anders stellte. »Wir hatten ja immer leichthin gesagt: die Bahn des Elektrons in der Nebelkammer kann man beobachten. Aber vielleicht war das, was man wirklich beobachtet, weniger. Vielleicht konnte man nur eine diskrete Folge von ungenau bestimmten Orten des Elektrons wahrnehmen. Tatsächlich sieht man ja nur einzelne Wassertröpfchen in der Kammer, die sicher sehr viel ausgedehnter sind als ein Elektron. Die richtige Frage muß also lauten: Kann man in der Quantenmechanik eine Situation darstellen, in der sich ein Elektron ungefähr – das heißt mit einer gewissen Ungenauigkeit – an einem gegebenen Ort befindet und dabei ungefähr – das heißt wieder mit einer gewissen Ungenauigkeit – eine vorgegebene Geschwindigkeit besitzt, und kann man diese Ungenauigkeit so gering machen, daß man nicht in Schwierigkeiten mit dem Experiment gerät? Eine kurze Rechnung ... bestätigte, daß man solche Situationen mathematisch darstellen kann und daß für die Ungenauigkeiten jene Bezie-

Alles ist etwas ungenau

hungen gelten, die später als Unbestimmtheitsrelationen der Quantenmechanik bezeichnet worden sind.«
In diesem Zusammenhang bedarf aber die Formulierung »Schwierigkeiten mit dem Experiment« einer näheren Erläuterung. Im Experiment bemüht man sich, den Ablauf bestimmter, uns interessierender physikalischer Prozesse meßtechnisch zu erfassen. Das bedeutet, daß mit dafür geeigneten Sonden vielleicht der Ort, die Geschwindigkeit oder der Impuls von Teilchen im Zeitablauf gemessen wird.

Meßfühler stören

Es war schon in der klassischen Physik bekannt, daß Meßfühler oder Meßsonden entsprechend ihrer Konstruktion einen Eingriff in den Ablauf des zu registrierenden Prozesses darstellen und ihn dadurch mehr oder weniger stören und verändern. Nach den bisherigen Annahmen konnte man alle derartigen Verzerrungen korrigieren und aus den Meßergebnissen den Zustand des Objektes ermitteln, wie er sich unabhängig von der Messung darstellt. Je kleiner jedoch das zu untersuchende Objekt ist, desto leichter ist sein Zustand zu stören. *Heisenberg* zeigte nun, daß wir dadurch bei den uns bekannten kleinsten Objekten, den atomaren Bausteinen, in einer Lage sind, aus der es keinen Ausweg gibt. Meßobjekt und Meßgerät sind hier nahezu gleich groß. Das ist aber nicht alles. In der atomaren Welt gibt es, wie wir seit *Planck* wissen, keinen beliebig kleinen Energieaustausch. Alle Wechselwirkungen erfolgen in bestimmten kleinen Portionen oder Quanten. Dies führt aber in der Regel zu einem Übergang des Systems in einen neuen Quantenzustand, und es ist deshalb nicht möglich, die Angaben über den ursprünglichen Zustand unbegrenzt zu verfeinern. So sagt die Unbestimmtheitsrelation aus, daß z. B. das Produkt aus dem Fehler in der Ortsbestimmung und dem Fehler der Impulsmessung eines Teilchens immer größer als das Plancksche Wirkungsquantum oder ihm gleich ist. Das heißt, wenn man den Ort des Teilchens mit großer Genauigkeit bestimmt, dann kann man den Impuls nur sehr ungenau angeben.

Grenzen der Genauigkeit

Hier wird die Paradoxie der Quantentheorie deutlich. Einerseits formulieren wir Gesetze, die anders sind als die der klassischen Physik, andererseits müssen wir auf der Seite des Beobachters die Sprache der klassischen Physik verwenden, weil wir keine andere Sprache haben, in der wir unsere Ergebnisse ausdrücken und anderen mitteilen können, wie es ja das Anliegen jeder Naturwissenschaft ist.

Natur und Dialektik

Was ist Komplementarität?

In die gleiche Richtung wie die Unbestimmtheitsrelationen zielte auch der von *Bohr* neu geprägte Begriff der Komplementarität. Nach Bohr sollte ein und dasselbe Geschehen, wie das Licht, mit zwei verschiedenen, sich einander ausschließenden Betrachtungsweisen erfaßt werden können. Die Betrachtungsweisen, z. B. bei der Lichtausbreitung die Beschreibung als Welle und bei der Lichtabsorption die Beschreibung als Teilchen, ergänzen sich aber auch und ermöglichen dadurch erst eine anschauliche und umfassende Darstellung des Phänomens. Es zeigte sich nach gründlichen Diskussionen, daß es keinen ernsthaften Unterschied zwischen den Deutungen von *Bohr* und *Heisenberg* gab.
Mit dem Komplementaritätsprinzip war es Bohr geglückt, das historisch entstandene Begriffssystem der Physik mit dem Fortschritt des Wissens über die Gesetze des Atomaufbaus in Übereinstimmung zu bringen. Dieses Prinzip hat unser Denken erweitert und deutlich gemacht, daß sich in der Atom- und Kernphysik insbesondere die Fragestellungen nach dem Wesen physikalischer Erscheinungen selbst ändern. Ähnliche Gedanken waren in dieser oder jener Form schon länger bekannt und von verschiedenen Philosophen formuliert worden. So sprach *Aristoteles* davon, daß »die Harmonie eine Vermischung und Verbindung von Widersprüchen darstellt«. Auch die Auffassungen *Hegels* und

Dialektische Widersprüche

die marxistische Dialektik lassen sich in diesem Zusammenhang auf die Begriffe der Quantenmechanik anwenden.
Viele Physiker, unter anderem auch *Einstein,* waren jedoch nicht bereit, die neuen Gedanken und Theorien als eine endgültige Klärung der mikrophysikalischen Vorgänge gelten zu lassen. Es war für sie schwer, in der »Welt der Atome« die bisherige Grundlage der wissenschaftlichen Arbeit aufzugeben, nach der die unabhängig von uns in der objektiven Welt nach festen Gesetzen in Raum und Zeit ablaufenden Vorgänge mit mathematischen Gleichungen eindeutig beschrieben werden konnten. Heute ist die Quantentheorie zu einem festen Bestandteil der Physik geworden, und es hat sich inzwischen vielfach bestätigt, daß bei mikrophysikalischen Vorgängen die mathematischen Symbole der theoretischen Physik in Form einer Wahrscheinlichkeitsaussage nur das Mögliche und nicht das Tatsächliche abbilden, obwohl jeder einzelne Vorgang nach festen Gesetzen in Raum und Zeit abläuft.

Fragen an die Natur

Genauso bedeutsam wie die richtige Fragestellung als Ausgangspunkt für die Entwicklung einer Theorie ist auch die Auswahl der Experimente, durch die wir der Natur unsere Fragen stellen und deren Beantwortung uns auf dem Wege der Erkenntnis weiterhelfen soll. Wenn schon viele Erfahrungen vorliegen, gelingt es teilweise sofort, den geeignetsten experimentellen Lösungsweg zu finden. Des öfteren zeigen aber auch die Ergebnisse, daß man sich geirrt hat. Doch auch dann war die Arbeit nicht umsonst, sondern trägt zum späteren Auffinden des richtigen Lösungsweges bei. Selten werden aber in Berichten über erfolgreiche Arbeiten die Fehlschläge aufgezählt, die dem gelungenen Experiment vorangingen. Deshalb sollte das Bild den Uneingeweihten nicht trügen, wenn im folgenden nur erfolgreiche experimentelle Untersuchungen genannt werden, die wesentlich die Grundlage für die heutige Kernphysik und Kerntechnik mitgeschaffen haben. Es ist sicher, daß dies nicht die einzigen Arbeiten auf diesen Gebieten waren.

Isotope

Durch die radioaktiven Zerfallsreihen sind uns Atomarten mit der gleichen Ordnungszahl im Periodensystem der Elemente, also mit der gleichen Kernladung, aber verschiedenen relativen Atommassen bekannt. Nach *Soddy* (1910) bezeichnet man diese als Isotope. Radioaktive Isotope sind zwar an den Unterschieden ihrer charakteristischen Strahlung erkennbar, können aber chemisch auf keine Weise getrennt und als verschiedene Atomarten erkannt werden. Deshalb hatte man an dieser Stelle lange im dunkeln getappt. Erst nachdem *Moseley* den Begriff der Ordnungszahl, *Rutherford* das Kernmodell des Atoms, *Fajans,* sowie *Soddy* und *Fleck* die Verschiebungsregel des radioaktiven Zerfalls eingeführt hatten, formulierte *Soddy* den erlösenden Gedanken der Isotopie.
J. J. Thomson (1910) gelang am Beispiel des Neons der Nachweis, daß die bis dahin nur mit chemischen Verfahren rein dargestellten stabilen Elemente in vielen Fällen auch Isotopengemische sein können. Er benutzte dazu die zu-

Atome in der Kurve

erst von *W. Wien* entwickelte Parabelmethode in einer ihrer neueren Formen (Bild 13). Ein feines Bündel von Kanalstrahlen aus Ionen des zu untersuchenden Elements tritt durch ein elektrisches und ein magnetisches Feld, die parallel zueinander angeordnet sind. Die Ionen werden bei gegebener Masse und Ladung um so stärker abgelenkt, je kleiner ihre Geschwindigkeit ist. Bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten erzeugen die Ionen auf einer geeignet angeordneten fotografischen Platte das Bild einer Parabel. Enthalten die Strahlen Ionen verschiedener Masse oder Ladung, entstehen mehrere getrennte Parabeln. Auf dieser Grundlage beruht das Verfahren der Massenspektrometrie, das seit 1919 besonders von *Aston* außerordentlich verfeinert worden ist. Seine sich über viele Jahre erstreckenden Messungen der Isotopenmassen ergaben erstaunliche

Resultate. Das Modell eines aus Bausteinen zusammengesetzten Kerns läßt erwarten, daß die Masse des Kerns ein ganzzahliges Vielfaches der Masse des einzelnen Bausteins ist. Die entsprechende ganze Zahl wird Massezahl genannt. Die von *Aston* gemessenen relativen Atommassen wichen aber in vielen Fällen von der Massezahl ab. Die ermittelte Differenz zwischen beiden Größen heißt Massendefekt. Zur Deutung dieser Erscheinung trug *Rutherford* 1929 auf einer Tagung der Royal Society folgende Idee vor:

Massendefekt

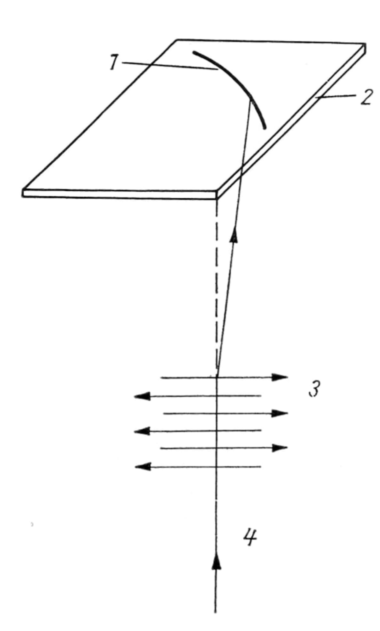
»Die Massendifferenz zwischen dem freien und dem im Kern gebundenen Proton ist einem Packungseffekt zuzuschreiben, d. h. der Wechselwirkung des elektromagnetischen Feldes der Protonen und Elektronen im hochgradig kondensierten Kern (mit großer Dichte). Nach den letzten Erkenntnissen wissen wir, daß eine enge Beziehung zwischen Masse und Energie (*Einsteins* Relation $E = m \cdot c^2$) besteht. Das freie Proton besitzt eine Masse von 1,0073, während die Masse des Protons im Atomkern sehr nahe bei 1 liegt. Dieser anscheinend geringe Massenverlust bedeutet, daß beim Eintreten des freien Protons in die Struktur des Kerns ein großer Energiebetrag freigesetzt wird, der etwa 7 MeV entspricht.«

Woher stammt die Energie?

Die relativen Atommassen weichen jedoch nicht bei allen Atomarten gleichermaßen von der Ganzzahligkeit ab. Zur Vereinfachung des Zahlenvergleichs werden in Tabelle 1 in der Mehrzahl solche Elemente angeführt, die nur aus einem bzw. vorwiegend aus einem Isotop bestehen. Betrachtet man die Reihe der Atomarten genau, entdeckt man etwas sehr Interessantes. Bis etwa zum Sauerstoff haben die leichten Elemente eine relative Atommasse, die etwas größer ist als die entsprechenden ganzen Zahlen (Massezahlen). Die relativen Atommassen der mittleren Elemente bis ungefähr zum Iridium liegen etwas darunter, während die relativen Atommassen der schweren Elemente wieder über den Massezahlen liegen. Dieser Umstand ist bemerkenswert, wenn wir uns etwa folgendes Experiment vorstellen.

Wir versuchen, mittlere Elemente aus leichten aufzubauen. Dann ergibt sich, daß die relative Atommasse der Ausgangsstoffe (ganze Zahlen plus etwas) größer ist als die relative Atommasse des Endprodukts (ganze Zahl minus etwas). Nach dem Gesetz von der Erhaltung der Masse und der Energie kann aber die Massendifferenz nicht irgendwohin verschwinden, sondern sie kann sich nach *Einsteins* Relation nur in Energie verwandeln. Auf diese Weise wäre also eine Energieerzeugung möglich.

Keiner denkt an praktische Nutzung



13 Parabelmethode nach Wien
1 *Parabel;* 2 *Fotoplatte;* 3 *elektrische und magnetische Ablenkfelder;* 4 *Ionenstrahl*

Tabelle 1. Relative Atommassen und Massezahlen

Element	Ordnungs-zahl	Relative Atommasse	Massezahl	Relative Verteilung in %
Wasserstoff	1	1,0080	1	99,9844
Helium	2	4,003	4	99,9999
Beryllium	4	9,02	9	100
Sauerstoff	8	15,9994	16	99,759
Aluminium	13	26,97	27	100
Phosphor	15	30,98	31	100
Rhodium	45	102,91	103	100
Jod	53	126,92	127	100
Zäsium	55	132,91	133	100
Tantal	73	180,88	181	100
Iridium	77	193,1	191	38,5
			193	61,5
Gold	79	197,2	197	100
Thorium	90	232,12	232	100
Uran	92	238,07	234	0,0051
			235	0,71
			238	99,28

Ähnlich liegen die Verhältnisse, wenn schwere Elemente zu mittleren abgebaut werden. Die radioaktive Strahlung der schweren Elemente kann als ein derartiger Vorgang betrachtet werden. Die herausgeschleuderten schnellen Teilchen führen dann die Energie mit sich, die bei diesem Prozeß frei wird. Diese Teilchen sind jedoch kaum für eine Energieerzeugung in größerem Maßstab nutzbar.
Radioaktive Stoffe, die schnell zerfallen, sind nur in relativ geringen Mengen erhältlich, während die Mehrzahl zu lange Zeit zum Zerfall braucht. Man kann zwar theoretisch einen Ozeandampfer durch die beim spontanen Zerfall von 0,5 kg Uran freigesetzte Energie über den Atlantik treiben, müßte aber eine Fahrzeit von etwa 1000 Millionen Jahren einplanen, da sich der radioaktive Zerfall durch keinerlei Einflüsse beschleunigen läßt.

Künstliche Kernreaktionen

Alchimie mit Alphateilchen

Mit diesen Problemen setzte sich auch *Rutherford* auseinander, und ihm gelang 1919 die erste künstliche Freisetzung von Kernenergie und damit die Bestätigung unseres Gedankenexperiments im Labor. Er beschoß Atome eines Elements mit schnellen Alphateilchen und verwandelte sie dadurch in Atome eines anderen Elements. Trotz verbesserter Versuchsapparaturen waren die Experimente sehr mühsam, und nur für ein Alphateilchen unter vielen Tausenden konnte man eine Kernreaktion auf dem Fluoreszenzschirm registrieren. Dabei bleibt, wie man bald mit Hilfe von Untersuchungen in der Wilsonkammer erkannte, das Alphateilchen im getroffenen Kern stecken, der dafür ein sehr schnelles Proton herausschleudert. Die kinetische Energie des Protons erwies sich als erheblich größer als die des steckengebliebenen Alphateilchens. Bei einer solchen Kernreaktion wird also im Atom wirklich Energie frei. Auf der Grundlage der genauen Messungen von *Aston* konnte die Masse des erzeugten Kerns mit der Masse des Kerns vor der Umwandlung verglichen und durch Bilanzierung der gesamten

Energie die Einsteinsche Formel über die Äquivalenz von Masse und Energie bestätigt werden.
Über viele Jahre hinweg blieben die Alphateilchen ein erfolgreich eingesetztes experimentelles Hilfsmittel zum Beschuß insbesondere der leichten Kerne. Die schweren Kerne waren wegen ihres mit der großen Kernladung verbundenen elektrischen Potentialwalles mit diesen gleichartig geladenen Geschossen nicht angreifbar. 1930 bemerkten *Bothe* und *Becker*, daß die Elemente Beryllium und Bor unter der Einwirkung von Polonium-Alphateilchen eine sehr durchdringende Strahlung aussenden, die sie zunächst für eine sehr kurzwellige Gammastrahlung hielten. *Curie* und *Joliot* stellten fest, daß diese Strahlung die Eigenschaft hat, Protonen mit großen Geschwindigkeiten aus wasserstoffhaltigen Stoffen herauszuschlagen. Diese Entdeckung führte zu ernsten Schwierigkeiten bei der theoretischen Beschreibung, wenn man an der Interpretation als Gammastrahlung festhielt.

Neue Teilchen?

Der englische Physiker *Chadwick* beschäftigte sich ebenfalls mit den Eigenschaften der neuentdeckten Strahlung. 1932 in London, auf einer speziellen Tagung der Royal Society zur Struktur der Atomkerne, berichtete er über seine Ergebnisse: »Es zeigt sich, daß die Strahlung nicht nur aus Wasserstoff, sondern auch aus Helium, Lithium, Beryllium usw. und vermutlich aus allen Elementen Teilchen herausschlägt. In jedem Fall scheinen die Teilchen Rückstoßatome der Elemente zu sein. Es erschien unmöglich, die Aussendung dieser Teilchen einem Rückstoß von einem Strahlungsquant ohne Masse zuzuschreiben, wenn Energie und Impuls bei den Stößen erhalten bleiben sollen. Eine befriedigende Erklärung der experimentellen Ergebnisse erhielt man, wenn man annahm, daß die Strahlung nicht aus Quanten, sondern aus Teilchen der Masse 1 und der Ladung 0 oder Neutronen besteht.«

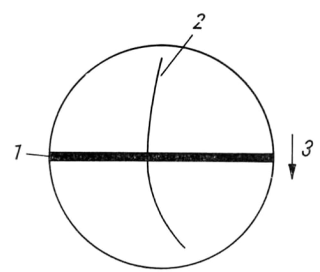
Entdeckung der Neutronen

Genauere Abschätzungen lieferten für die Neutronenmasse einen Wert zwischen 1,005 und 1,008 und unterstützten so die Ansicht, daß das Neutron eine Kombination aus Proton und Elektron sei, was schon vor der Entdeckung des Neutrons in vielen Spekulationen vermutet worden war. Die große Durchdringungsfähigkeit der Neutronen ist auf das Fehlen einer eigenen Ladung zurückzuführen. Sie werden daher durch die elektrischen Felder der Atomkerne der von ihnen durchdrungenen Stoffe nicht beeinflußt und treten nur in den sehr seltenen Fällen mit den Kernen in Wechselwirkung, wenn sie diese direkt treffen. Deshalb kann man die Neutronen nur indirekt beobachten und muß ihre Eigenschaften aus dem Verhalten der geladenen Kerne ableiten, die sie durch Stoß in Bewegung gesetzt haben.
Es gibt aber noch andere interessante Arten von Zusammenstößen, bei denen das Neutron selbst eine Umwandlung hervorruft. Zuerst wurde bekannt, daß Stickstoffkerne bei Beschuß mit Neutronen Alphateilchen aussenden und sich bei dieser Reaktion in Borkerne umwandeln. Mit den Neutronen stand jetzt ein weiteres Hilfsmittel für die »Kernchirurgie« zur Verfügung, von dessen Einsatz man mit berechtigter Hoffnung weitere Erkenntnisse über die Mikrowelt erwarten konnte.

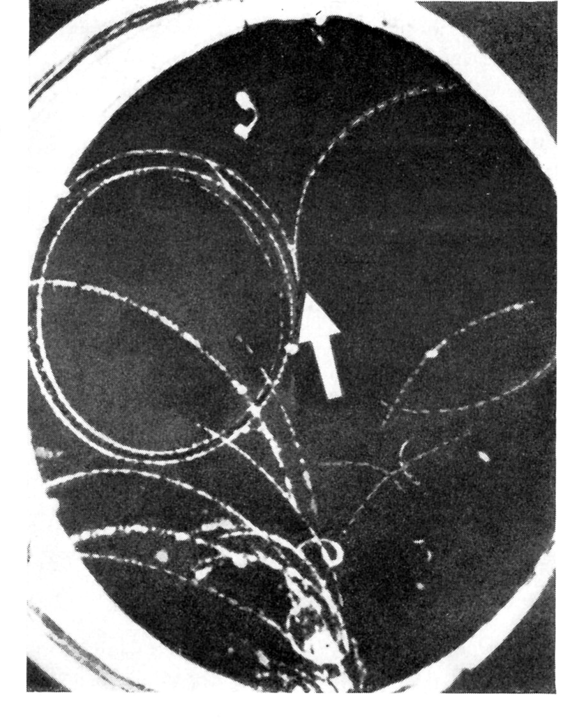
Neue Kernmodelle

Neutronen und Protonen im Kern

Der experimentelle Nachweis des Neutrons regte natürlich neue Überlegungen zur Kernstruktur an. Schon vier Monate nach *Chadwicks* Veröffentlichung im Juni 1932 trat der damals an der Universität Leipzig tätige *Heisenberg* mit einer Theorie auf, nach der die Atomkerne sich aus Protonen und Neutronen zusammensetzen sollten. Etwa gleichzeitig und unabhängig von ihm hatte der sowjetische Physiker *Iwanenko* gleiche Vorstellungen entwickelt.
Heisenbergs Meinung zufolge sollte die Kernstruktur nach den Gesetzen der Quantenmechanik durch die Wechselwirkung zwischen den Kernteilchen beschrieben werden können, und die Protonen und Neutronen sollten durch starke,



14 Schema der Nebelkammeraufnahme eines Positrons
1 *Bleiplatte;* 2 *Bahnspur;* 3 *Flugrichtung*



15 Nebelkammeraufnahme der Paarbildung von Positron und Elektron aus energiereicher Gammastrahlung

Kernkräfte

bisher noch nicht bekannte Kräfte zusammengehalten werden. Die Kritiker fragten natürlich zuerst nach den Elektronen, die doch offensichtlich beim radioaktiven Betazerfall den Atomkern verlassen.
Im Bestreben, einen möglichen Mechanismus für die Wechselwirkung zwischen den Kernteilchen vorzuschlagen, hielt *Heisenberg* deshalb an der Idee fest, daß die Neutronen aus einer bestimmten Kombination von Protonen und Elektronen bestehen. Dieses Bild deutet auf die Vorstellung hin, die starken Kräfte zwischen Proton und Neutron kommen durch den Austausch des Elektrons zwischen diesen beiden Teilchen zustande. Es war jedoch nicht so recht einzusehen, warum es nicht auch starke Kräfte zwischen einem Proton und einem Proton oder einem Neutron und einem Neutron geben sollte. Und bei so vielen Ähnlichkeiten zwischen Neutron und Proton sah es unvernünftig aus, das eine als einfach, das andere als zusammengesetzt aufzufassen.

Antielektron fällt vom Himmel

Eine andere aufsehenerregende Entdeckung brachte neue Gesichtspunkte. Schon einige Zeit kannte man eine Strahlung, die offensichtlich von außerhalb der Erde kommt und die Atmosphäre durchdringt. Man hatte ihr den Namen Höhenstrahlung gegeben. In der Reihe der dieser Strahlung gewidmeten Untersuchungen beobachtete *Anderson* 1932 in Kalifornien mit Hilfe der Wilsonkammer einen bemerkenswerten Fall, der sofort im Mittelpunkt des Interesses stand.
Einige Jahre vorher hatte nämlich *Dirac* das Problem behandelt, die einem Elektron zugeordneten Wellen mathematisch zu erfassen. Nach der mathematischen Formulierung in der relativistischen Diracgleichung sollte es neben den elektrisch negativ geladenen Elektronen noch eine zweite ähnliche Teilchensorte geben, die elektrisch positiv geladen war. Mit den genannten Eigenschaften müßte sich diese ganz anders verhalten als die bisher bekannte Materie. Ein Beobachter würde ein Zusammentreffen eines derartigen Teilchens mit einem Elektron als gegenseitige Vernichtung eines positiven und eines negativen Elektrons deuten, bei der ihre Massen sich in so viel Energie verwandeln, wie ihnen nach der Einsteinschen Formel zukommt.

Nun war *Anderson* eine Nebelkammeraufnahme gelungen, aus der die Existenz eines solchen »Antielektrons«, eines Positrons, eindeutig hervorging. Die Dichte der Spur entsprach genau dem Wert, wie er für ein Elektron bekannt war. Aus der Bahnkrümmung, die auf die Wirkung eines anliegenden statischen Magnetfelds zurückzuführen war, mußte aber auf eine positive elektrische Ladung geschlossen werden, da man durch die abbremsende Wirkung einer Bleiplatte in der Mitte der Nebelkammer eindeutig die Flugrichtung des Teilchens bestimmen konnte (Bild 14).

Durch die Entdeckung des Positrons war eine neue Lage entstanden. Jetzt konnte man auch das Proton als zusammengesetzt aus Neutron und Positron auffassen. Dann würde es eine Symmetrie zwischen Proton und Neutron geben. Doch war es überhaupt noch sinnvoll, nach Elektron oder Positron im Atomkern zu fragen, wenn sie als Pärchen aus Energie auch erzeugt werden können?

Paarbildung

Denn dieser Prozeß, die sogenannte Paarbildung, wurde von *Chadwick* und *Blackett* bei der Absorption energiereicher Gammastrahlen durch Blei beobachtet (Bild 15). Diese Frage konnte bis heute noch nicht allgemein geklärt werden (s. S. 46).

Fortschritte der experimentellen Technik

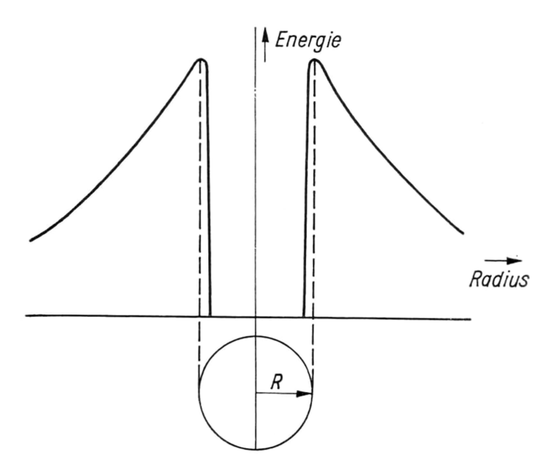
Erhebliche Fortschritte auf dem Gebiet der Kernreaktionen gab es durch eine experimentelle Technik, deren Entwicklung eine interessante Vorgeschichte hat.

Rutherford lenkte 1927 die Aufmerksamkeit auf einige widersprüchliche Resultate in der Abschätzung der Kernradien, die man einerseits durch Streuexperimente mit Alphateilchen und andererseits bei der Interpretation des spontanen Alphazerfalls auf der Grundlage klassischer Vorstellungen erhalten hatte.

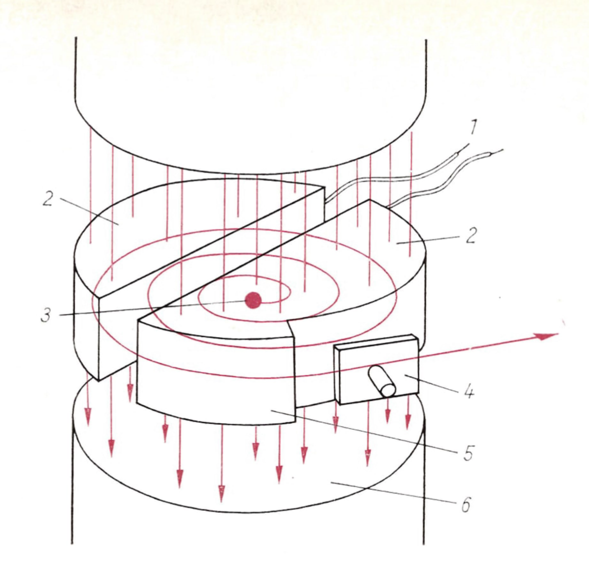
Teilchen finden einen Tunnel

Ein geladenes Teilchen im Innern eines Atomkerns sieht, nach dem bisher gültigen Modell, am Kernrand einen Potentialberg vor sich (s. Bild 16), den es nur mit der dafür ausreichenden Energie überschreiten kann. *Gamow* (1928) und unabhängig davon *Condon* und *Gurney* (1928) klärten die Verhältnisse durch den Hinweis, daß es mit der Theorie der Quantenmechanik vereinbar sei, wenn dieses Teilchen den Potentialwall durchdringe und es nicht unbedingt über ihn hinweggehoben werden müsse.

Es erscheint natürlich auf den ersten Blick etwas unverständlich und nur im Trickfilm möglich, daß man hinter eine Wand gelangen kann, indem man einfach durch sie hindurchgeht. Solche Zweifel sind für größere Gegenstände durchaus berechtigt, und die mit der Schrödingergleichung berechenbare Wahr-



16 Modell des Potentialwalls um den Atomkern



17 Prinzip des Zyklotrons
1 Hochfrequenzgenerator; 2 D-förmige Elektroden; 3 Teilchenquelle; 4 Ablenkungseinrichtung für beschleunigte Teilchen; 5 Austrittsfenster; 6 Magnetfeld

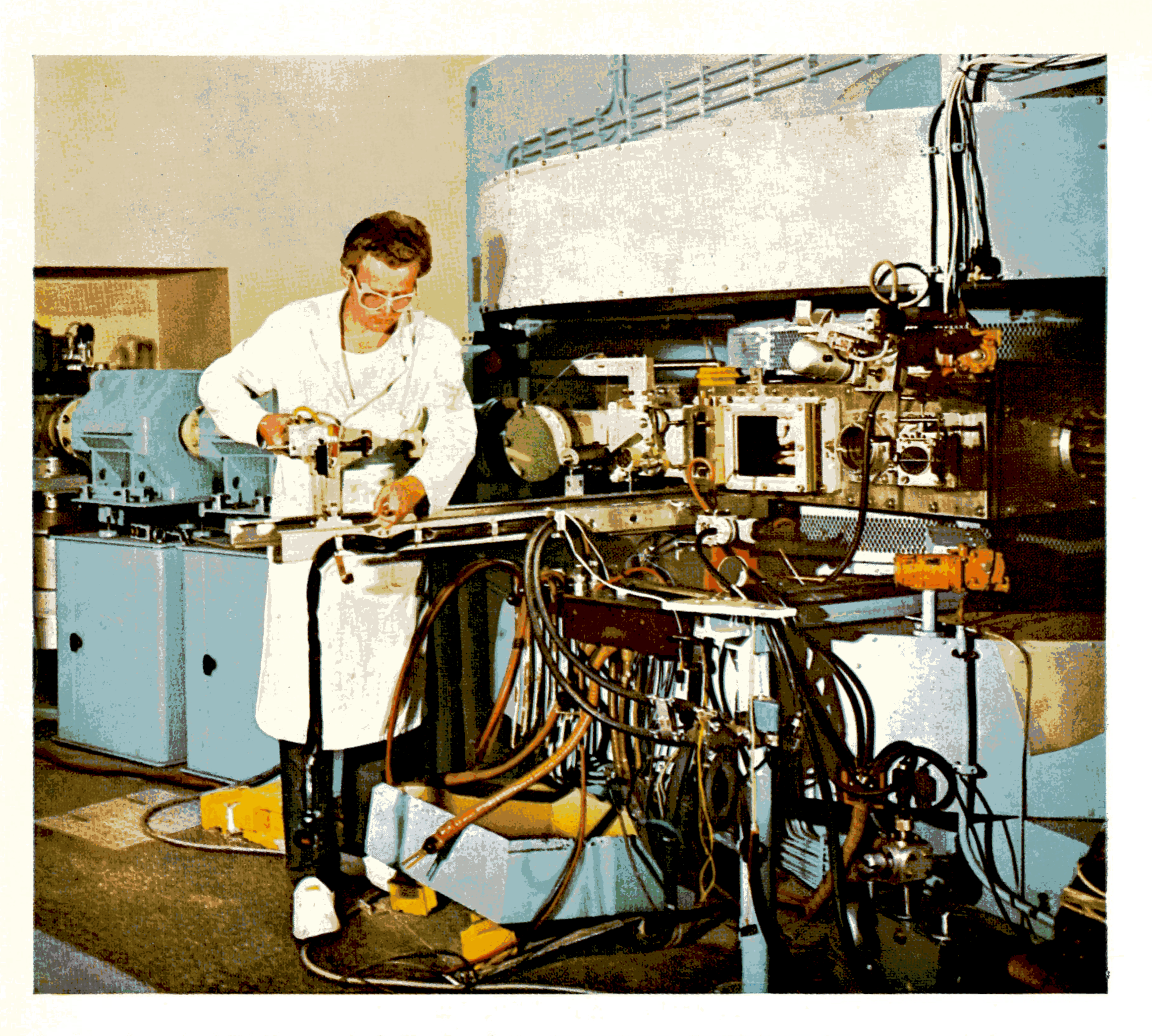
scheinlichkeit z. B. für einen Tennisball, durch eine Dachrinne einfach hindurchzufallen, ist so gering, daß es aussichtslos ist, darauf zu warten. Je geringer jedoch die Masse des Objektes ist, desto größer wird die Wahrscheinlichkeit für diesen sogenannten Tunneleffekt, und so erschien es durchaus sinnvoll, sich Experimente zum Beschuß der Atomkerne mit geladenen Mikroteilchen zu überlegen. Hatte man früher Spannungen von vielen Millionen Volt zur Beschleunigung von Protonen als nötig betrachtet, so könnten nach der Entdeckung des Tunneleffekts schon einige hunderttausend Volt ausreichen.

Die Artillerie wird gerüstet

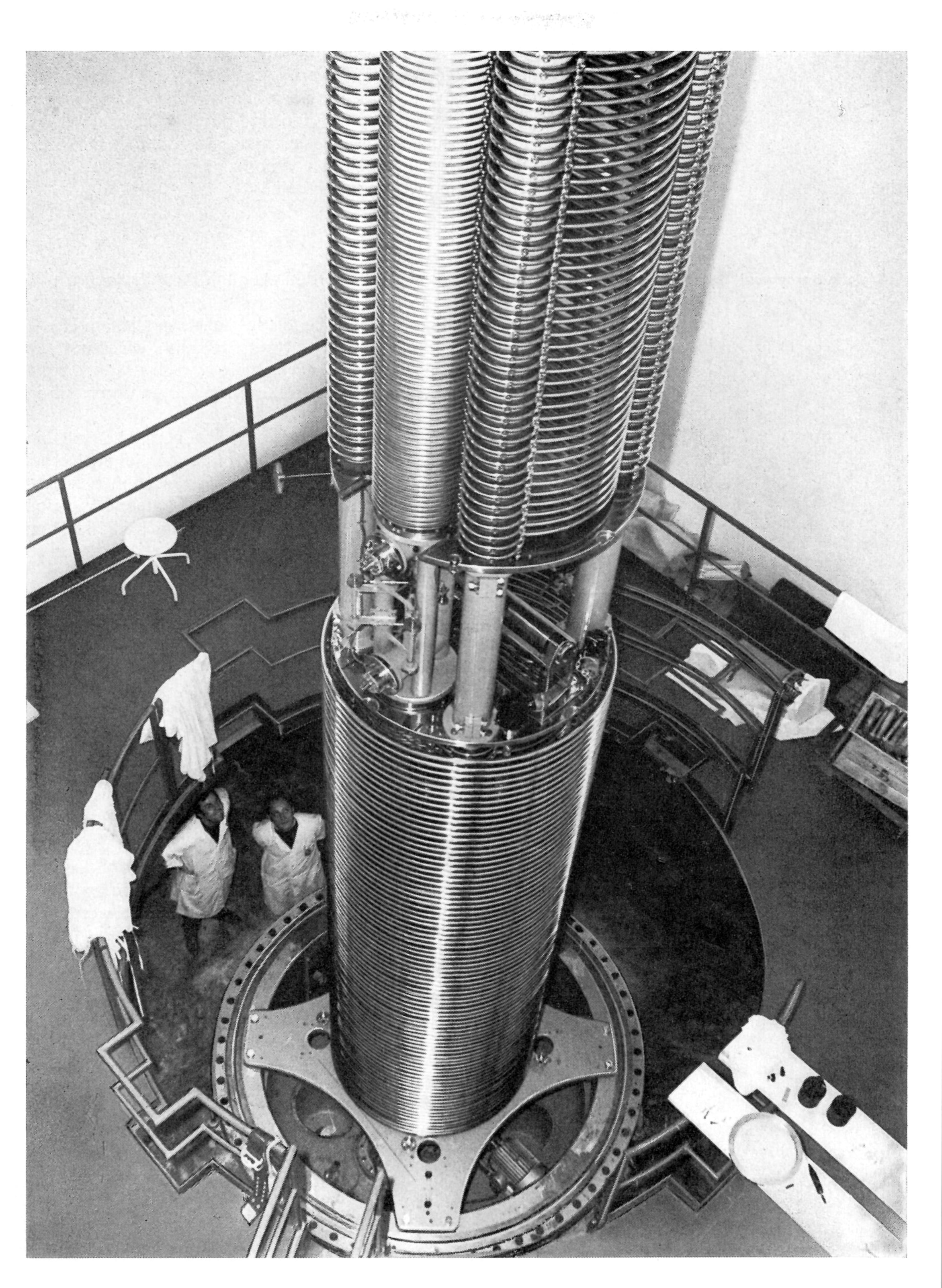
Gamow besuchte 1928 das Cavendish Laboratorium in Cambridge und diskutierte mit *Cockroft* die Anwendung seiner Idee. In vierjähriger harter Arbeit bauten *Cockroft* und *Walton* zusammen mit ihren Mitarbeitern den später nach ihnen benannten Hochspannungsgenerator auf. Mit diesem Gerät beschleunigten sie Protonen auf eine Energie bis zu 800 keV und lenkten sie auf Lithiumkerne, die durch den Beschuß in jeweils zwei Heliumkerne umgewandelt wurden. Ähnliche Experimente wurden wenige Monate später von zwei Forschungsgruppen aus Washington und Berkeley bekannt.

1929 begann *Lawrence* an der University of California mit dem Entwurf des Zyklotrons. Bei diesem Gerät durchläuft der magnetisch auf eine kreisförmige Bahn gebogene Teilchenstrahl sehr oft die gleiche zwischen zwei halbkreisförmigen Elektroden, den sogenannten Duanten, anliegende Spannung (Bild 17). Etwa in der Mitte der Anlage, nicht genau im Zentrum, werden geladene Teilchen erzeugt.

Liegt an den Duanten eine Spannung im richtigen Sinne, so werden die Teilchen beim Passieren des Spalts beschleunigt und laufen mit erhöhter Geschwindigkeit in die gegenüberliegende Elektrode hinein, in deren Inneren kein elektrisches Feld vorhanden ist. Wird jetzt die Spannung zwischen den Duanten umgepolt, was beim Anlegen einer hochfrequenten Wechselspannung selbsttätig geschieht, so hat dieser Vorgang keinen Einfluß auf das Teilchen, das dann beim Übertritt von einem Duanten in den anderen wiederum beschleunigt wird. Der Halbkreis, längs dessen sich die Teilchen im Innern der Duanten bewegen, wird mit wachsender kinetischer Energie immer größer. Die Teilchen laufen schließlich, nach vielen einzelnen Beschleunigungsschritten, die einer Gesamtspannung von mehreren Millionen Volt entsprechen können, am Rande des Magnetfelds um und werden durch eine Ablenkplatte aus der Anlage herausgeführt (Bild 18). Die Ergebnisse der ersten kernphysikalischen Untersuchungen mit Protonen-Energien bis zu 1 MeV wurden 1932 publiziert.



18 Zyklotron im ZfK Rossendorf. Sicht auf die Apparaturen zur Untersuchung des herausgeführten Teilchenstrahls



19 Beschleunigungssäule eines Tandemgenerators im ZfK Rossendorf

1933 veröffentlichte man die ersten Arbeiten mit einem weiteren neuartigen Gerät, einem elektrostatischen Generator nach *van de Graaff*. Mit diesen experimentellen Mitteln wurde ein neues, weitgestecktes Forschungsgebiet eröffnet und in der Folgezeit, bei Verbesserung der Apparaturen und der Nachweisverfahren, viele durch schnelle Ionen ausgelöste Kernreaktionen untersucht (Bild 19). So gewann man nach und nach ein klareres Bild von den Eigenschaften der Atomkerne und der in diesem Bereich wirksamen Kräfte.

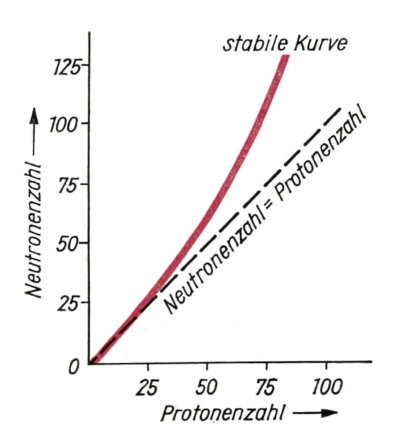
Kernkräfte

Welche Kerne sind stabil?

Bild 20 zeigt die Verteilung der stabilen Kerne bezüglich ihrer Protonen- und Neutronenzahl. Stabil nennt man diejenigen Kerne, die sich ohne Arbeitsaufwand nicht in Teilkerne zerlegen lassen. Die Lage der leichteren stabilen Kerne in der Nähe der Diagonalen (Protonenzahl = Neutronenzahl) weist auf die Symmetrie der Kernkräfte hin. Das bedeutet, daß sich die starken Kräfte, die die Kernmaterie zusammenhalten, bei einer Vertauschung von Proton und Neutron nicht ändern.
Offenbar sind in diesem Bereich die neutronenreichen Kerne, verglichen mit den Kernen auf der Diagonalen, ebenso unstabil wie die protonenreichen Kerne. Daraus läßt sich nun wiederum schließen, daß die Kräfte zwischen den Protonen untereinander und auch zwischen den Neutronen untereinander gleich groß sein müssen. Die Anziehungskräfte zwischen Neutronen und Protonen müssen jedoch größer sein und zu einer festeren Bindung führen, da sich nur so die Lage der stabilen Kerne auf der Diagonalen verstehen läßt.
Bei den schwereren Kernen ist zu berücksichtigen, daß die Protonen eine positive elektrische Ladung aufweisen. Die damit verbundene elektrostatische Abstoßung zerstört die Symmetrie des Kerns und führt dazu, daß protonenreiche schwere Kerne bedeutend instabiler sind als die entsprechenden neutronenreichen Kerne. Deshalb ist die Stabilitätslage schwerer Kerne nach der Seite der neutronenreichen Kerne verschoben.

Praxis erfordert Näherungen

Will man die Verhältnisse im Atomkern im einzelnen studieren, stößt man bei der theoretischen Behandlung auf grundsätzliche Schwierigkeiten. Es müssen sowohl Quanten- als auch Relativitätstheorie berücksichtigt werden, und außerdem verlangen die aus vielen Teilchen zusammengesetzten Kerne die Behandlung als mechanisches Vielkörperproblem. Für eine Beschreibung des Atomkerns kommen daher grundsätzlich nur Näherungsmethoden in Betracht. Möglichst alle bisherigen experimentellen Ergebnisse für die Auswahl des entsprechenden, vereinfachten Modells müssen dabei berücksichtigt und von den vielfältigen theoretischen Möglichkeiten die geeignetsten ausgesucht werden.



20 Zusammensetzung der stabilen Atomkerne aus Protonen und Neutronen

Sehr erfolgreich auf diesem Gebiet war *Heisenberg,* der über seine Arbeitsmethode folgendes verriet:
»Ich kann eigentlich nicht einsehen, warum viele ... das nur scheinbar nüchterne, wissenschaftliche Denken so enttäuschend finden. Es ist ja gar nicht richtig, daß es in der Wissenschaft nur auf das logische Denken und auf das Verständnis und die Anwendung der festgefügten Naturgesetze ankommt. In Wirklichkeit spielt doch die Phantasie im Reich der Wissenschaft und gerade auch der Naturwissenschaft eine entscheidende Rolle. Denn selbst wenn zur Gewinnung der Tatsachen viel nüchterne, sorgfältige, experimentelle Arbeit nötig ist, so gelingt das Zusammenordnen der Tatsachen doch nur, wenn man sich in die Phänomene eher hineinfühlen als hineindenken kann.«

Auch die Großen irren

Immer größere Beschleuniger wurden gebaut, um noch tiefer in das Innere der Mikrowelt einzudringen. Doch schien dieser Weg nicht zu einer technischen Nutzung der Kernkräfte zu führen. *Rutherford* hatte dazu folgende Meinung:
»Bisher ist ja auch keine Rede davon, daß man aus den Prozessen an den Atomkernen Energie gewinnen könnte. Denn es wird zwar bei der Anlagerung eines Protons oder Neutrons an einen Atomkern im Einzelprozeß wirklich Energie frei. Aber um zu erreichen, daß ein solcher Prozeß stattfindet, muß man sehr viel mehr Energie aufwenden, zum Beispiel zur Beschleunigung sehr vieler Protonen, von denen die meisten nichts treffen. Der allergrößte Teil dieser Energie geht in Form von Wärmebewegung praktisch verloren. Energetisch ist also das Experimentieren an Atomkernen bisher ein reines Verlustgeschäft. Wer von einer technischen Ausnutzung der Atomkernenergie spricht, der redet einfach Unsinn.«

Künstliche Radioaktivität

Im Pariser Radium-Forschungsinstitut beschäftigten sich seit dem Sommer 1933 *Irene Joliot-Curie* und *Frédéric Joliot* mit der Fortsetzung der experimentellen Arbeiten von *Chadwick.* Nach Beryllium wurden weitere Elemente darauf untersucht, ob sie beim Beschuß mit Alphateilchen ebenfalls Neutronen aussenden, denn vieles war auf diesem Gebiet noch ungeklärt. Beim Aluminium hatten die Forscher sogar dreifachen Erfolg. Neben den bekannten Protonen und den gesuchten Neutronen entstand noch eindeutig nachweisbar eine dritte Teilchensorte, die aus der Höhenstrahlung bekannten Positronen.

Künstlich erzeugte Strahler

Eine Überraschung erlebten die beiden Forscher, als sie das Aluminiumpräparat einmal nach der Beendigung der Bestrahlung mit Alphateilchen noch weiter beobachteten. Es waren trotzdem noch Positronen zu registrieren, deren Intensität nur langsam abnahm, ähnlich wie man es von radioaktiven Präparaten gewohnt war. Zahlreiche Wiederholungen des Versuches bestätigten immer wieder das zuerst gefundene Resultat. Es blieb kein Zweifel. Das vor der Bestrahlung stabile Aluminium verhielt sich danach genauso wie eine radioaktive Substanz. 1934 wurde der Bericht über diese Entdeckung veröffentlicht.
Der bisher durch keinerlei Mittel beeinflußbare radioaktive Zerfall konnte künstlich ausgelöst werden. Es handelte sich bei den ersten Versuchen um absolut unsichtbare, unwägbare Mengen, die aber durch die radioaktive Strahlung sicher nachgewiesen werden konnten. Diese Eigenschaft der künstlich radioaktiven Isotope als durch Strahlung markierte Elemente hat später zu zahlreichen, bedeutungsvollen Anwendungen auf vielen Gebieten der Naturwissenschaft, Technik und Medizin geführt.

Neutronen als Skalpell

Der italienische Physiker *Enrico Fermi* war der erste, der für die »Kernchirurgie« den Vorteil der Verwendung der ungeladenen Neutronen gegenüber den geladenen Alphateilchen erkannte. Mit diesen durchdringenden Geschossen bestrahlte *Fermi* systematisch fast alle Elemente des Periodensystems bis zum höchsten Element. Auch beim Uran fand er Umwandlungen, die unter Abgabe

von Betastrahlen vor sich gingen, wie sie von anderen künstlich radioaktiven Isotopen inzwischen bekannt waren. *Fermi* schloß aus den Ergebnissen, daß aus dem Uran ein oder sogar mehrere Elemente oberhalb des Urans entstanden sein müßten, die man in der Natur bisher noch nicht kannte.

Zweifel an der Theorie

Da Zweifel an der Richtigkeit der Erklärung von *Fermi* aufkamen, wiederholte *Otto Hahn* (Bild 21) zusammen mit *Lise Meitner* und später auch *Fritz Straßmann* die Versuche der Erzeugung von den sogenannten Transuranen, denn wohl niemand hatte zu der Zeit mehr radiochemische Erfahrung als diese Gruppe. Sie konnten auch schnell in umfassenden, auf die Reaktion von Neutronen mit Thorium erweiterten Versuchen noch mehr neue Stoffe herstellen, die damals alle für Elemente jenseits des Urans angesehen werden mußten. Niemand zweifelte an den Ergebnissen, denn nach einem bisher immer gültigen Prinzip mußte die bei der Reaktion von Neutronen mit Uran auftretende Betastrahlung eine Bildung des nächsthöheren Elements anzeigen. Die Reaktionsprodukte lagen bisher auch immer in unmittelbarer Nachbarschaft der bestrahlten Elemente. Ein völliges Auseinanderbrechen, etwa des Urans, galt für absolut unmöglich. Doch bei einigen anderen Forschern traten nach der Neutronenbestrahlung von Uran und Thorium angeblich auch Radiumisotope auf. Das war höchst erstaunlich und theoretisch nicht zu erklären. Auch *Hahn* konnte experimentell diese Befunde nicht bestätigen. Plötzlich waren erneut Zweifel an den Transuranen da.

Kernspaltung

Hahn erklärte später, daß er zusammen mit *Straßmann* eigentlich unbeabsichtigt 1938 zu Ergebnissen kam, die zu den bisherigen Anschauungen der Physiker in striktem Gegensatz standen. Sie fanden unter den Reaktionsprodukten mehrere Vertreter des Elements Barium, dessen chemische Eigenschaften denen des Radiums sehr ähnlich sind. »Dieses Element Barium steht im System der Elemente an 56. Stelle, das Uran an 91. Immer wieder glaubten wir an einen Irrtum unsererseits. Aber unsere nach den verschiedensten Seiten vorgenommenen Versuche ließen uns keinen Ausweg. Unter dem Einfluß der Neutronen zerplatzt der schwere Atomkern Uran in zwei etwa halb so große Teilchen, von denen der eine Teil das Barium war. Ein völlig unerwarteter neuartiger Prozeß.«

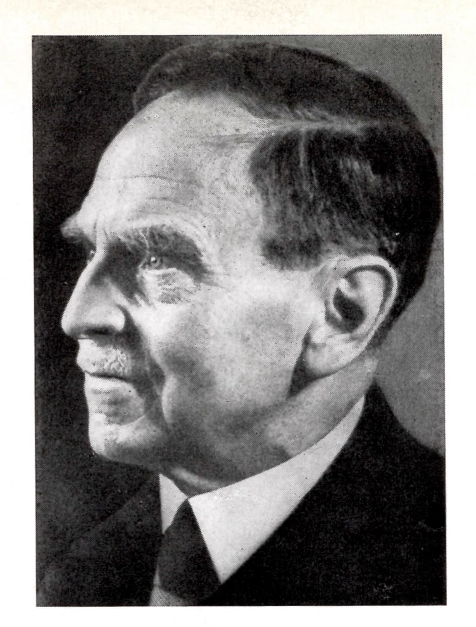
Kerne werden geknackt

Bald hatte man den bei der Gesamtbilanz der Spaltung noch fehlenden Partner gefunden. Es war das Edelgas Krypton mit der Kernladungszahl 36. Zusammen mit der Kernladungszahl des Barium 56 ergibt sich 92, die Kernladungszahl des Urans (Bild 22). In vielen Laboratorien wurden die überraschenden Ergebnisse nachgeprüft und bestätigt. Dabei stellte sich heraus, daß es neben der zuerst entdeckten Reaktion noch viele verschiedene Möglichkeiten der Spaltung gibt, die zu Isotopen der mittleren Elemente des Periodensystems, zu Strontium, Lanthan, Xenon, Jod und anderen, führen.

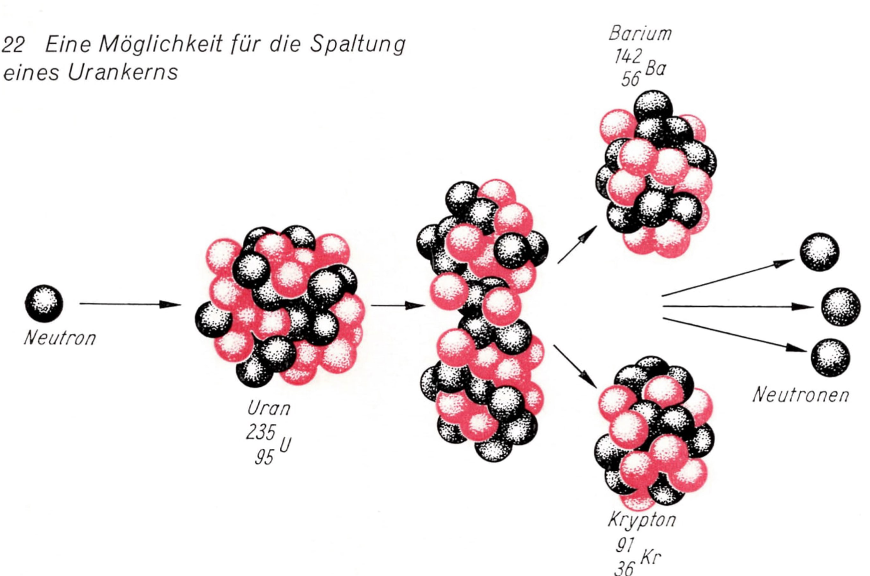
Riesige Energie wird frei

Unmittelbar nach den ersten Veröffentlichungen wiesen zuerst *Lise Meitner* und *Otto Robert Frisch* auf die außerordentlich große Energieentwicklung hin, die bei der Spaltung von Uran vor sich gehen müsse, millionenmal größer als etwa die Energie, die bei der Verbrennung einer gleich großen Menge Kohle frei wird. Der entdeckte Prozeß der Spaltung entspricht nämlich dem vorher nicht für möglich gehaltenen Abbau eines schweren Kerns zu zwei mittleren Kernen. Im Gegensatz zum radioaktiven Zerfall, dessen Geschwindigkeit mit keinem Mittel zu beeinflussen ist, kann man es so einrichten, daß der Spaltungsprozeß an sehr vielen Kernen gleichzeitig abläuft. Dabei kann der Mensch die Wahrscheinlichkeit für die Einzelspaltung zwar auch nicht beeinflussen. Trotzdem war so ein Weg gefunden worden, die Kernenergie freizusetzen und praktisch nutzbar zu machen, was *Einstein* vorher nur theoretisch für möglich gehalten hatte. Die Größe der freiwerdenden Energie läßt sich aus der Massendifferenz des gespaltenen schweren Kerns und den Spaltprodukten (zwei mittlere Kerne) nach der Einsteinschen Relation berechnen.

21 Otto Hahn



22 Eine Möglichkeit für die Spaltung eines Urankerns



Im Nachruf auf den 1968 verstorbenen *Otto Hahn* macht uns *Walter Gerlach* deutlich, auf welche Weise solche bedeutenden wissenschaftlichen Leistungen zustande kommen können:

»Die Selbstbescheidung auf das, was er methodisch beherrschte und auf Grund eigener Versuche wußte, das unablässige Streben nach letzter Klarheit einer wissenschaftlichen Aussage entsprach der persönlichen Bescheidenheit, der absoluten Zuverlässigkeit und Wahrhaftigkeit in menschlichen Fragen. Sein Urteil über die Leistungen anderer – bei genauester Kenntnis der umfangreichen Literatur – war ebenso gerecht wie das über Menschen, erkannte Fehlurteile bekannte er offen. Die auch das tägliche Denken und Handeln bestimmende Gewissenhaftigkeit ließ ihn jeder Unklarheit, auch den minimalsten Unregelmäßigkeiten in den eigenen Messungen nachgehen. Die zu ihrer Klärung erforderliche mühevolle, sorgsamst-kritische Kleinarbeit, seine Unermüdlichkeit,

die mit unendlichem Fleiß erreichte meisterhafte Beherrschung der Methoden führten ihn zu den großen Entdeckungen.«

Überraschung für die Theoretiker

Die Theoretiker hatten schon längere Zeit den Atomkern mit einem Flüssigkeitstropfen verglichen. Auf Grund dieser Vorstellung waren die Volumenenergie, die Oberflächenspannung und die elektrostatische Abstoßung im Innern des Tropfens aus den empirischen Daten abgeschätzt worden. Zu aller Überraschung stellte sich nun heraus, daß der so unerwartete Vorschlag der Kernspaltung sich als durchaus verständlich erwies. *Heisenberg* bemerkte dazu: »Bei sehr schweren Atomkernen war der Vorgang der Spaltung ein Prozeß, der unter Energieabgabe von selbst ablaufen konnte, bei dem es also nur eines kleinen Anstoßes von außen bedurfte, um ihn in Gang zu setzen. Ein auf den Atomkern geschossenes Neutron kann also die Spaltung bewirken. Es schien beinahe merkwürdig, daß man nicht schon vorher an diese Möglichkeit gedacht hatte.«

Sehr wichtig für die weitere Entwicklung war der von *Joliot* und seinen Mitarbeitern im Frühjahr 1939 gelieferte Nachweis, daß bei dem durch Neutronen ausgelösten Spaltprozeß zusätzlich noch einige Neutronen frei werden. Das eröffnete einen grundsätzlich neuen Weg mit ungeahnten Aussichten.

Eine Lawine kommt ins Rollen: Kettenreaktion

Bisher hatte man mit großem Aufwand an Energie geladene Teilchen beschleunigen müssen, um mit ihrer Hilfe eine kernphysikalische Reaktion auslösen zu können. Jetzt hatte man entdeckt, daß die gleichen Teilchen, welche die Spaltung bewirken, bei diesem Vorgang ohne zusätzlichen Eingriff wiederum erzeugt werden. Wesentlich ist noch, daß es sogar zwei bis drei Neutronen sind. Da man wegen der geringen Größe der Kerne nicht eine totale Treffsicherheit erwarten kann und immer mit gewissen Verlusten rechnen muß, wird es wahrscheinlicher, daß von diesen neugeborenen Neutronen wenigstens eines wiederum eine Spaltung auslöst.

Kann man eine solche Anordnung von spaltbarem Material schaffen, in der immer wieder genau eins der zwei bis drei bei einer Spaltung entstehenden Neutronen eine neue Spaltung bewirkt, würde das eine sich selbst erhaltende unendliche Folge von Spaltungen bedeuten, eine sogenannte Kettenreaktion. Damit wäre man endlich über die bisherigen Verlustgeschäfte hinaus.

Wärme aus Kernenergie

Bei jeder Spaltung wandelt sich ein Teil der Kernmasse in Bewegungsenergie der Spaltbruchstücke um. Durch deren Abbremsung in der umgebenden Materie wird diese kinetische Energie auf die Atome und Moleküle der Umgebung übertragen, was ja bekanntlich eine Erwärmung bedeutet. Diese Wärme kann durch Kühlmittel aus dem System herausgeführt und auf übliche Art genutzt werden. So ist der grundsätzliche Weg zur lange nicht für möglich gehaltenen praktischen Nutzung der Kernenergie vorgezeichnet.

Ständige Weiterentwicklung

Was wissen wir heute über die Struktur der Materie? Im Laufe der Jahre wurden immer mehr Elementarteilchen entdeckt. Heute sind es bereits über 200 verschiedene Sorten dieser Teilchen.

In der letzten Zeit haben sich jedoch die Vorstellungen über die Bausteine der Materie stark verändert, sie erscheinen uns heute keineswegs mehr so »elementar« im früheren Sinne. Der bekannte sowjetische Physiker *N. N. Bogoljubow* bemerkte zu diesem Problem: »Im Prozeß der Wechselwirkung können sie (die Elementarteilchen) sich ineinander umwandeln. Aber man kann nicht sagen, daß die einen aus anderen, sozusagen elementareren Teilchen bestehen. Wir haben eine quantitativ neue Stufe im Verständnis der Mikrowelt erreicht. Bis zur Schaffung eines vollständigen Bildes jedoch stehen uns noch sehr viele Erkundigungen bevor. Ich glaube, daß wir niemals in der Lage sein werden, das kleinste Teilchen der Materie angeben zu können. Die Erkenntnis hat keine

Grenzen. Wir werden auf neue erstaunliche Objekte der Mikrowelt stoßen, und womöglich erweist es sich, daß unsere Frage an die Natur nach dem elementarsten Teilchen inkorrekt gestellt ist.«
Auch eine allseitig zufriedenstellende Theorie auf diesem Gebiet hält *Bogoljubow* für unwahrscheinlich. »Wenn es uns gelingt, alles, was uns heute über die Elementarteilchen bekannt ist, in einem System zu vereinigen, dann werden wir als von ewiger Neugier getriebene Forscher, indem wir weiter in die Tiefen der Mikrowelt vordringen, unweigerlich auf neue Erscheinungen stoßen, die sich nicht in unser Schema einfügen lassen. Die Physik der Elementarteilchen im weiteren Sinne wird niemals ein Ende finden.«

2

Detektoren für Kernstrahlung

Die Sinnesorgane melden Kernstrahlung nicht

Kernstrahlung ist mit den Sinnesorganen des Menschen nicht wahrnehmbar. Man kann sie nicht sehen wie die optische Strahlung, das Licht, und sie ist nicht hörbar wie die akustische Wellenstrahlung, der Schall.
So war die Existenz der Röntgenstrahlung, der radioaktiven Strahlung und anderer Arten ionisierender Strahlung bis zum Ausgang des vorigen Jahrhunderts den experimentierenden Physikern verborgen geblieben.
Wollen wir uns noch einmal vergegenwärtigen, daß zu dieser Zeit bereits ein weitgehend abgerundetes physikalisches Weltbild geschaffen worden war, das wir heute als die klassische Physik bezeichnen. Viele Physiker waren damals der Auffassung, daß nun eigentlich alle physikalischen Probleme zumindest im Prinzip gelöst wären, man meinte, das physikalische Weltbild sei damit abgeschlossen. Und sie ahnten nicht, daß ununterbrochen eine energiereiche Strahlung, die Höhenstrahlung, aus dem Kosmos auf die Erde einfällt, um nur ein Beispiel für die damals noch unbekannten Strahlenarten zu nennen. Es fehlte ein Nachweisinstrument, ein Detektor für diese Strahlung, der die Strahlungsenergie in eine Signalform zu verwandeln gestattet, die mit den menschlichen Sinnesorganen wahrgenommen werden kann.
In dieser Situation trat im Jahre 1895 etwas Unerwartetes ein, das überragende Bedeutung gewinnen sollte und von dem wir schon im vorhergehenden Abschnitt gehört haben: *Wilhelm Conrad Röntgen* entdeckte eine neue Strahlung.
Mit diesem Ereignis begann auch die Entwicklung einer Meßtechnik zum Nachweis dieser neuartigen Strahlung, es wurden neue Detektorsysteme konzipiert, und man hoffte, durch Verbesserung der Nachweismethoden und der Detektoranordnungen weitere unbekannte Strahlungsarten zu finden.
Dieser konsequent verfolgte Weg hat dann unter anderem zur Entdeckung der radioaktiven Strahlung geführt, und auch heute noch wird mit ständig verbesserten Detektorsystemen in den großen Kernforschungszentren bei der Erforschung hochenergetischer Strahlung nach neuen Strahlungskomponenten gesucht.
Strahlendetektoren sind also notwendig, um überhaupt Kenntnis von der Strahlung zu erhalten, die auf andere Weise vom Menschen nicht wahrgenommen werden kann. In diesem Sinn haben die Detektoren und Meßsysteme grundlegende Bedeutung für die gesamte Entwicklung der Kerntechnik. Wir wenden

uns deshalb nun der Frage zu: Durch welche physikalischen Vorgänge, die in Strahlendetektoren ablaufen, wird die Strahlung wahrnehmbar? Das wird besonders Leser interessieren, die physikalische Zusammenhänge erkennen wollen, während für andere Fragestellungen zur Kerntechnik diese Kenntnisse nicht unbedingt erforderlich sind.
In den folgenden Abschnitten wollen wir uns auf die wichtigsten Detektoren und Meßgeräte beschränken, die bereits weitverbreitet praktische Anwendung finden und denen wir beispielsweise in Kliniken oder Produktionsbetrieben begegnen können.

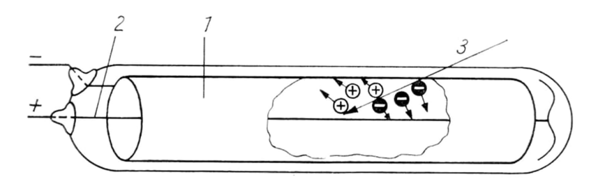
Ionisationskammern

Prinzip: Strahlenwirkung in Gasen

Ionisierende Strahlung kann man messen, wenn man die Wirkung der verschiedenen Strahlenarten in Gasen und Festkörpern ausnutzt. Das Prinzip der Ionisationskammern und Zählrohre beruht auf der Strahlenwirkung in Gasen. In Szintillationszählern und Halbleiterdetektoren dagegen werden die in Festkörpern erzeugten Effekte benutzt.
Die Wirkungsweise einer Ionisationskammer läßt sich anschaulich mit der in Bild 23 dargestellten Anordnung beschreiben. Sie zeigt ein an den Enden zugeschmolzenes Glasrohr, in das ein Metallrohr *1* und ein für die Funktion des Detektors geeignetes Gas eingeschlossen ist. In der Mitte des Glasrohres ist ein leitender Draht *2* aufgespannt. Das Metallrohr und der Draht dienen als Elektroden, an die beim Betrieb des Detektors eine elektrische Spannung angelegt wird.
Um die Vorgänge in dem bestrahlten Gasvolumen beschreiben zu können, müssen wir uns daran erinnern, daß Atome aus dem Atomkern und den Elektronen, die sich in den Elektronenschalen befinden, bestehen. Die Elektronen werden im Atomverband festgehalten, und ein Maß für die Festigkeit dieser Bindung ist die Energie, die man aufbringen müßte, wenn man ein Elektron aus dem Atomverband entfernen wollte. Diese Energie liegt für die Elektronen der äußersten Elektronenschale in der Größenordnung einiger Elektronenvolt. Entsprechendes gilt ebenfalls für die aus Atomen zusammengesetzten Moleküle.

Nachweis von Betateilchen

Wenn nun ein Betateilchen in die Nähe eines Gasmoleküls gelangt, dann kann aus dem Molekül ein Elektron herausgeschlagen werden. Elektrisch gleichartig geladene Teilchen stoßen sich bekanntlich ab, und so wird verständlich, daß bei starker Annäherung eines Betateilchens an ein Hüllenelektron dieses Elektron aus dem Molekül gewissermaßen »herausgestoßen« wird.
Die Energie für das Losreißen des Elektrons muß der Bewegungsenergie des Betateilchens entnommen werden, das Betateilchen fliegt also nach dem Stoß langsamer als vorher. Da aber die Energie von Betastrahlen häufig in der Größenordnung von Megaelektronenvolt liegt, können sehr viele Elektronen aus Gas-



23 Grundkonstruktion von Ionisationskammern und Zählrohren. Form und Anordnung der Elektroden ist bei den einzelnen Ionisationskammertypen sehr unterschiedlich
1 *Metallrohr;* 2 *leitender Draht;* 3 *Betateilchen*

molekülen herausgestoßen werden, bevor das Betateilchen seine gesamte Bewegungsenergie verbraucht hat, und so entsteht eine große Anzahl freier Elektronen und Ionen längs der Flugbahn des Betateilchens.
Diese Elektronen und Ionen lassen sich nun leicht nachweisen, wenn man zwischen Draht und Metallrohr eine elektrische Spannung legt. Dann werden die Elektronen und Ionen durch das elektrische Feld im Rohr abgesaugt, und es fließt ein Strom. Dieser Strom wird mit einem Meßinstrument gemessen, und die angezeigte Stromstärke wächst proportional mit der Strahlungsintensität.
Dabei liegt an den Elektroden eine Spannung, bei der sämtliche im Gasvolumen entstehenden Elektronen und Ionen bis zu den Elektroden gelangen. Dieser Spannungswert wird Sättigungsspannung genannt.

Sättigungsspannung

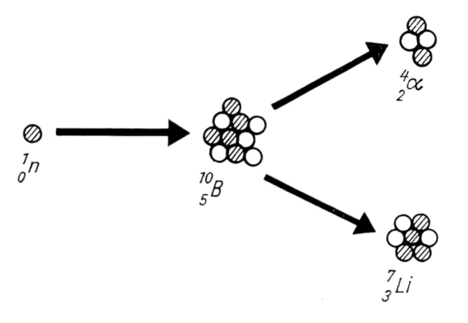
Unterhalb der Sättigungsspannung treffen nicht alle Ionen und Elektronen auf die Katode bzw. Anode, ein Teil von ihnen vereinigt sich wieder zu elektrisch neutralen Teilchen und trägt dann nicht mehr zum Meßvorgang bei. Durch diesen Rekombination genannten Vorgang wird der Strom in der Ionisationskammer stark spannungsabhängig und damit für Strahlungsmessungen schlecht geeignet. Im Sättigungsbereich dagegen ändert sich der Strom bei Spannungsschwankungen kaum, da ja sämtliche Elektronen und Ionen durch das elektrische Feld abgesaugt werden und auf diese Weise der Stromfluß begrenzt ist.
Der beschriebene Vorgang kann jedoch nur beim Beschuß des Gases mit elektrisch geladenen Teilchen, also beispielsweise Alpha- oder Betateilchen, erfolgen, denn elektrisch neutrale Teilchen wie Neutronen oder auch Gammastrahlen können nicht durch elektrische Abstoßung oder elektrische Anziehung Elektronen aus dem Molekül entfernen.
Die Absorption von Gammastrahlen erfolgt über 3 verschiedene Reaktionen, die wir bereits kennengelernt haben: Fotoeffekt, Comptoneffekt und Paarbildung.

Freie Elektronen durch Gammastrahlen

Für den Nachweis von Gammastrahlen ist dabei wesentlich, daß bei diesen Vorgängen freie Elektronen mit zum Teil beträchtlicher kinetischer Energie entstehen. Diese Elektronen ionisieren ebenso wie das in Bild 23 eingezeichnete Betateilchen das Füllgas in der Ionisationskammer und können in der beschriebenen Weise gemessen werden. Die Gammastrahlung wird also über die bei der Absorption sekundär gebildeten Elektronen nachgewiesen.
Damit haben wir die physikalischen Prozesse angeführt, die dem Nachweis von geladenen Teilchen und Quanten zugrunde liegen. Wie aber werden Neutronen nachgewiesen?

Neutronennachweis über Umwege

Hier sind im wesentlichen 3 Prozesse von Bedeutung, die zu geladenen und damit ionisierungsfähigen Teilchen führen: die Erzeugung von Rückstoßkernen, die Kernspaltung und spezielle Kernreaktionen.
Wenn ein Neutron auf einen leichten Atomkern, z. B. einen Wasserstoffkern, stößt, dann überträgt sich ein Teil der Bewegungsenergie des Neutrons auf den »angestoßenen« Kern, d. h. auf das Proton. Das in diesem Fall entstehende Rückstoßproton kann nun auf Grund seiner kinetischen Energie ionisieren, womit ein direkter Nachweis der Neutronen möglich wird.
Um für energiereiche Neutronen empfindliche Kammern zu erhalten, trägt man auf der Kammerinnenwand eine Schicht Paraffin auf. Dann werden die im Paraffin befindlichen Protonen beim Zusammenstoß mit Neutronen beschleunigt aus der Paraffinschicht herausgeschlagen und können nun als schnell fliegende geladene Teilchen das Gas in der Ionisationskammer ionisieren.
Ähnlich kann auch der Prozeß der Kernspaltung durch Neutronen zum Neutronennachweis benutzt werden. Uns interessiert hier nur die Tatsache, daß die bei der Spaltung auseinanderfliegenden Bruchstücke des Atomkerns im allgemeinen elektrisch geladen sind und somit ebenfalls eine Ionisierung des Gases in der Ionisationskammer bewirken. Bei Benutzung dieses Prinzips wird auf der Kammerinnenwand eine Uranschicht aufgebracht.
Schließlich besteht die Möglichkeit, ionisierende Teilchen durch Kernreaktionen zu erhalten, die von Neutronen ausgelöst wurden. So wird z. B. die Re-



24 Neutronennachweis mit dem Borisotop B 10



25 Industrielle Betakammer. Sie wird in Geräten zur Flächenmassemessung eingesetzt

aktion $^{10}B(n, \alpha)^{7}Li$ für diese Zwecke ausgenutzt (Bild 24). Das entstehende Alphateilchen führt zu einer Ionisation im Füllgas der Ionisationskammer.
Nachdem wir die Wirkungsprinzipien von Ionisationskammern kennengelernt haben, wollen wir uns nun dem Einsatz dieser Kammern bei der Lösung von Meßaufgaben zuwenden.

Spezielle Ionisationskammern

Bedingt durch die Funktion ist es möglich, Ionisationskammern in sehr vielfältigen Spezialausführungen zu konstruieren. Sie gestatten eine konstruktive Anpassung an das Meßproblem; nachteilig ist allerdings, daß sehr kleine Kammerströme bis etwa 10^{-14} A zu messen sind.
Ionisationskammern für den Neutronennachweis werden zur Kontrolle von Kernreaktoren eingesetzt. Besonders günstige meßtechnische Eigenschaften sind mit Ionisationskammern bei Strahlenschutzmessungen zu erreichen, Spezialformen werden bei Präzisionsmessungen benutzt. In der industriellen Isotopentechnik haben sich Ionisationskammern langjährig beim Einsatz in Geräten zur Flächenmassenmessung bewährt. Als Beispiel dafür zeigt Bild 25 eine industrielle Betakammer. Im Bild sind die 7 Eintrittsfenster zu erkennen, die aus einer dünnen Aluminiumfolie bestehen, um die Absorption von Betateilchen beim Eintritt in das mit Gas gefüllte Volumen der Kammer möglichst gering zu halten.

Zählrohre

Zählrohre gehören heute zu den am meisten benutzten Strahlendetektoren, sie werden in industriellen Isotopenanlagen, in Strahlenschutzgeräten und Forschungslaboratorien eingesetzt.
Wie bei Ionisationskammern beginnt im Zählrohr die Signalbildung damit, daß Kernstrahlung bei Absorption in einem Gas die Gasmoleküle zerschlägt und so freie Elektronen und Ionen entstehen.

Anatomie eines Zählrohres

Bild 23 zeigt bereits den prinzipiellen Aufbau eines Zählrohres. Im allgemeinen besteht ein Zählrohr aus einer zylinderförmigen Hülse, die ein Gasvolumen einschließt, und in der Mittelachse dieser Hülse befindet sich ein Draht, der als positive Elektrode, als Anode, dient. Die Innenfläche der Hülse, in Bild 23 durch den Metallzylinder dargestellt, ist nach Anschluß der Spannungsquelle elektrisch negativ aufgeladen und wirkt als Katode. Zwischen den beiden Elektroden entsteht ein elektrisches Feld, sobald die Detektorspannung angelegt wird.
Wenn nun durch Absorption eines Betateilchens oder eines Gammaquants im

Gasraum Elektronen und Ionen entstehen, so wandern diese wie bei der Ionisationskammer unter dem Einfluß des elektrischen Feldes zu den Elektroden. Die Elektronen bewegen sich zu dem positiv geladenen Draht in der Zählrohrachse, während die Ionen zum negativ geladenen Zählrohrmantel wandern.

Vorgänge im Zählrohr

Bis zu dieser Phase sind die Vorgänge im Zählrohr und in der Ionisationskammer völlig gleich – jetzt entwickelt sich der Entladungsablauf aber unterschiedlich. Entscheidend dafür ist, daß in der dargestellten Anordnung beim Betrieb als Zählrohr eine höhere Spannung angelegt wird als die Sättigungsspannung, die für die Arbeitsweise als Ionisationskammer charakteristisch ist.

Bedingt durch die Anordnung der Anode im Zentrum des Zylinders sowie die hohe Betriebsspannung steigt die elektrische Feldstärke in Drahtnähe beim Annähern an den Draht rasch an. Damit erhöht sich die Geschwindigkeit der Elektronen bei ihrer Wanderung zum Draht immer mehr, und schließlich reicht ihre Bewegungsenergie, um aus Gasmolekülen zusätzlich Elektronen und Ionen zu erzeugen. Die neu entstandenen freien Elektronen werden im elektrischen Feld ebenfalls derart beschleunigt, daß auch sie wieder Gasmoleküle ionisieren können, und so setzt sich dieser Prozeß lawinenartig fort. Waren es

Elektronenlawinen

beim Absorptionsakt relativ wenige primär erzeugte Elektronen, so stürzt jetzt eine ganze Elektronenlawine auf den Anodendraht. Dabei entsteht ein verstärkter elektrischer Impuls – ein entscheidender Vorteil gegenüber Ionisationskammern.

Die Größe dieses elektrischen Impulses ist von der angelegten Zählrohrspannung abhängig. Wählt man diese Spannung so gering, daß noch keine Lawinenbildung auftritt, dann arbeitet die Anordnung, wie bereits erörtert, als Ionisationskammer. Steigert man die Spannung bis zum Einsatz der Lawinenbildung, dann bleibt die Elektronenlawine zunächst auf einen kleinen Bereich um den Anodendraht beschränkt, der elektrische Impuls ist noch etwa der Anzahl der primär entstandenen Elektronen proportional, die Anordnung arbeitet in diesem

Proportionalzählrohre

Fall als Proportionalzählrohr. Bei völliger Absorption der Strahlungsenergie im Zählrohrgas ist die Impulsamplitude diesem Energiebetrag annähernd proportional.

Wenn man die Zählrohrspannung weiter erhöht, entwickelt sich die Lawinenbildung dann derart stark, daß der Anodendraht in seiner gesamten Länge im Zählrohrinneren von der Entladungslawine schlauchartig umhüllt wird. Dann ist der elektrische Ausgangsimpuls unabhängig von der Anzahl der bei dem Absorptionsprozeß primär erzeugten Elektronen. Zählrohre in dieser Betriebsart werden Auslösezählrohre oder nach ihren Erfindern Geiger-Müller-Zählrohre genannt.

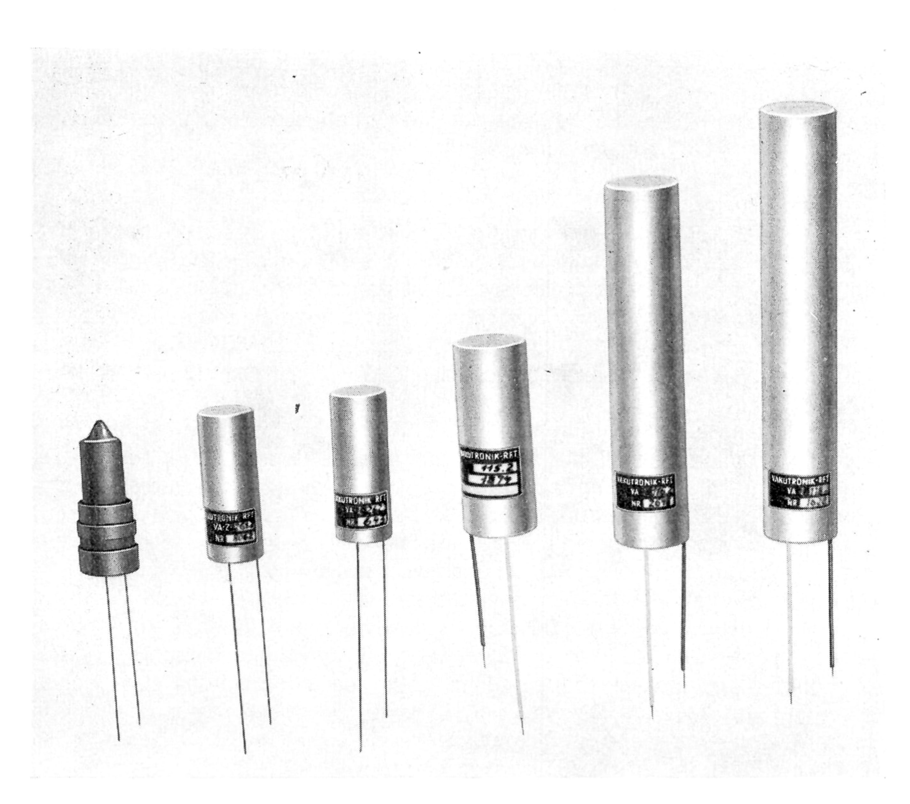
Um die qualitative Beschreibung der Vorgänge im Zählrohr abzurunden, muß noch etwas über den Weg der entstandenen Ionen im Zählrohr gesagt werden.

Diese Ionen bewegen sich relativ langsam zur Katode, da sie dort in Bereiche geringerer Feldstärke gelangen und ihre Masse auch viel größer als die der Elektronen ist. Bei Auslösezählrohren bilden diese Ionen ebenfalls eine Art Schlauch, der sich in Katodennähe über die gesamte Zählrohrlänge erstreckt. Dieser Schlauch positiver Ionen bewirkt nun, daß die Feldstärke im Zählrohr kurzzeitig derart herabgesetzt wird, so daß keine neue Lawinenbildung entstehen kann.

Zählrohr hat eine »Totzeit«

In dieser kurzen Zeitspanne nach einem Impuls ist das Zählrohr somit gegen Strahlung unempfindlich, man nennt sie »Totzeit des Zählrohres«, und sie beträgt etwa – abhängig von der speziellen Zählrohrkonstruktion – 100 Mikrosekunden, also 0,0001 Sekunden.

Es sei noch ein weiterer Unterschied zur Ionisationskammer hervorgehoben. Die Gasfüllung des Zählrohres muß so gewählt werden, daß die Entladungslawine wieder zusammenbricht. Es darf also keine Dauerentladung wie bei einer Glimmröhre auftreten. Das erreicht man durch Zusatz eines Halogens, Brom oder Chlor, zum Zählrohrgas, man spricht dann von halogengelöschten Zähl-



26 Zählrohre

rohren. Die Arbeitsspannung dieser Halogenzählrohre beträgt meist etwa 500 V.

Dem Einsatz angepaßt

Zählrohre werden in vielen speziellen Ausführungsformen industriell hergestellt. Für den Neutronennachweis verwendet man u. a. Bortrifluorid-Zählrohre, die das gasförmige Bortrifluorid enthalten. Durch die einfallenden Neutronen entstehen entsprechend der in Bild 24 dargestellten Reaktion Alphateilchen, die Impulse im Zählrohr auslösen und damit die Neutronen zu registrieren ermöglichen.

Zählrohre für Alpha- und Betateilchen haben dünnwandige Strahleneintrittsfenster, damit diese Strahlung überhaupt in das Zählrohr gelangt und nicht bereits durch die Zählrohrwand völlig absorbiert wird.

Bei Zählrohren für Gammastrahlen dagegen ist eine solche Konstruktion nicht erforderlich, die äußere Hülse besteht häufig aus Metall. Damit sind diese Zählrohre sehr widerstandsfähig gegen äußere Einwirkungen und eignen sich gut für den Einsatz in Geräten, die unter rauhen Betriebsbedingungen, unter dem Einfluß ätzender Dämpfe und mechanischer Erschütterungen, arbeiten müssen. Sie werden z. B. in großen Stückzahlen in Strahlenschranken eingesetzt. Eine Auswahl solcher Zählrohre zeigt Bild 26.

Szintillationszähler

Wurde bei Zählrohren und Ionisationskammern die Wirkung radioaktiver Strahlen auf Gase ausgenutzt, so gibt es auch Strahlendetektoren, bei denen man die Strahlenabsorption in Festkörpern bzw. Flüssigkeiten verwendet.

Lichtblitze signalisieren Strahlung

Bereits *Rutherford* hat Alphateilchen dadurch nachgewiesen, daß er Lichtblitze feststellte, die in bestimmten Substanzen beim Bestrahlen entstehen. Diese

Lichtblitze wurden zunächst unmittelbar mit dem Auge beobachtet. Die visuelle Beobachtung dieses schwachen Lichtes ist aber derart anstrengend und ungenau, daß diese Meßmethode mit der Entwicklung von Ionisationskammern und Zählrohren bald zurückgedrängt wurde.

Verstärkung durch SEV

Nach 1945 aber bot sich durch die während der Kriegsjahre entwickelten Sekundärelektronenvervielfacher (SEV), die selbst sehr schwache Leuchterscheinungen in elektrische Signale umwandeln können, die Möglichkeit, die in den Kristallen beim Bestrahlen entstehenden Lichtblitze mit einer Geräteanordnung zu zählen. Nun setzte eine stürmische Entwicklung dieser Meßmethode ein, die schließlich zu einem sehr leistungsfähigen Strahlungsmeßgerät geführt hat.

In Bild 27 ist schematisch der prinzipielle Aufbau eines Szintillationszählers dargestellt, und wir wollen nun die physikalische Wirkungsweise dieses Detektors erläutern.

Wenn z. B. ein Gammaquant in dem Kristall K absorbiert wird, dann entsteht in diesem speziellen Kristall ein Lichtblitz geringer Intensität. Ein Teil dieses Lichts fällt auf die hochempfindliche Fotokatode F des SEV. Aus dieser Fotokatode werden Elektronen durch das Licht »herausgeschlagen«, von der Innenseite der Fotokatode durch ein elektrisches Feld abgesaugt und in Richtung zur nächsten Elektrode, hier Dynode D genannt, beschleunigt.

Auf der Flugbahn zur nächsten Dynode erhöht sich die Geschwindigkeit und damit die kinetische Energie des Elektrons derart, daß dieses Elektron beim Aufprall auf die Dynode mehrere Elektronen aus dieser herausschlägt. Diese sogenannten Sekundärelektronen fallen unter der Wirkung des elektrischen Feldes auf die folgende Dynode, und dort werden von jedem auftreffenden Elektron wiederum mehrere Sekundärelektronen erzeugt. Auf diese Weise wächst die Elektronengruppe beim Passieren der Dynoden lawinenartig an, sie wird vervielfacht. Damit haben wir auch die Erklärung für das Wort Sekundärelektronenvervielfacher gefunden.

Wenn die Elektronenlawine schließlich auf die Anode A des SEV aufprallt, so hat man einen um mehrere Zehnerpotenzen verstärkten elektrischen Impuls erhalten, der sich mit elektronischen Geräten verarbeiten und registrieren läßt.

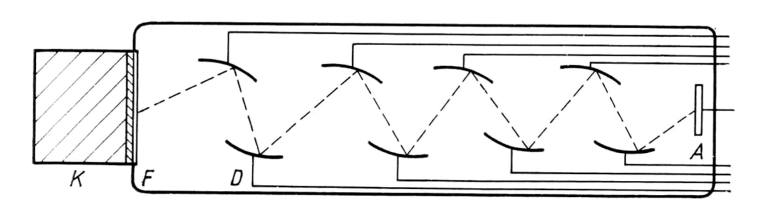
Die prinzipielle Wirkungsweise eines Szintillationszählers haben wir jetzt erklärt. Bisher ist aber die Frage unbeantwortet geblieben, weshalb sich ein im Verhältnis zu Zählrohren derart kompliziertes Detektorsystem in der Strahlenmeßtechnik behaupten kann.

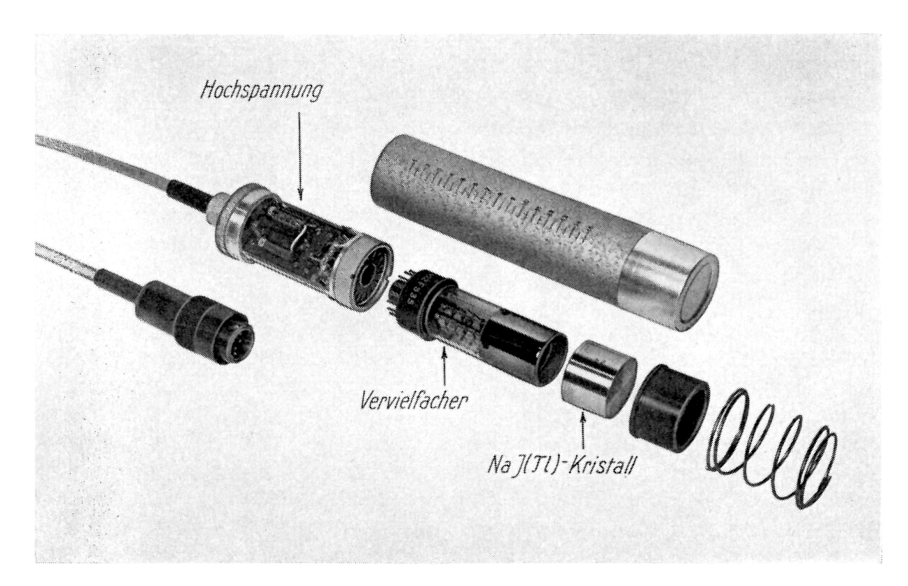
Es sind hauptsächlich 3 Eigenschaften, durch die der Szintillationszähler zu einem unentbehrlichen Hilfsmittel in der Kernstrahlungsmeßtechnik wurde: das hohe Zeitauflösungsvermögen, die Abgabe von energieproportionalen Impulsamplituden und der günstige Wirkungsgrad für Gammastrahlung. Außerdem gestatten diese Detektoren durch die Auswahl geeigneter Szintillatorkristalle ein Anpassen an eine Vielzahl spezieller Meßaufgaben. Im folgenden wollen wir diese günstigen Eigenschaften näher erläutern.

Kurze Impulse – hohe Zeitauflösung

Bei Szintillationszählern wird die noch meßbare Impulsdichte nicht durch eine Totzeit wie bei Auslösezählrohren begrenzt. Einmal verläuft der Vorgang der Elektronenvervielfachung in sehr kurzer Zeit. Übliche Werte dafür liegen in der

27 Grundkonstruktion eines Szintillationszählers
K Kristall; F Fotokatode; D Dynoden; A Anode





28 Eine Szintillationssonde im demontierten Zustand

Größenordnung von 10^{-8} Sekunden, und mit Spezialkonstruktionen sind wesentlich kürzere Zeiten zu erreichen. Zum anderen ist die Abklingzeit der Lichtemission in den Szintillatoren ebenfalls kurz, als ein typischer Wert kann 10^{-6} s genannt werden. Damit wird die Zeitauflösung in dem angeführten Beispiel durch den Szintillator bestimmt und beträgt größenordnungsmäßig 10^{-6} s, übertrifft also den für ein Zählrohr genannten Wert um den Faktor 100. Deshalb sind mit Szintillationszählern auch höhere Impulsdichten meßbar.

Impulshöhe entspricht Strahlungsenergie

Mit Szintillationszählern läßt sich die Energie z. B. von Gammaquanten bestimmen, die Impulshöhe am Detektorausgang ist diesem Energiebetrag proportional. Das wird verständlich, wenn man die physikalischen Vorgänge betrachtet: Je mehr Energie beim Absorptionsprozeß auf den Szintillator übergeht, desto mehr Licht entsteht, gelangt auf die Fotokatode und löst dort eine der Lichtmenge proportionale Anzahl Elektronen aus. Diese Proportionalität bleibt auch während der Lawinenbildung im Dynodenraum erhalten, so daß schließlich so viele Elektronen auf die Anode fallen, wie es der beim Absorptionsprozeß im Szintillator umgesetzten Energie entspricht.

Für die Genauigkeit dieser Energiemessung, der Energieauflösung, ist für Gammaquanten etwa 9% ein typischer Wert. Die Energieauflösung wird beschränkt durch die statistischen Schwankungen der Zahl der Lichtquanten und Sekundärelektronen, durch die von Impuls zu Impuls unterschiedliche Lichtsammlung und durch ähnliche Einflüsse. Bis zur Einführung von Halbleiterdetektoren, die genauere Energiemessungen gestatten, wurde die Strahlungsenergie hauptsächlich mit Szintillationszählern bestimmt. Für viele Anwendungen von Radionukliden genügt jedoch eine mittlere Energieauflösung, und Szintillationszähler behalten somit weiterhin einen festen Platz in der Strahlenmeßtechnik, zumal sie über eine oft entscheidende Eigenschaft verfügen: Sie haben eine relativ große Empfindlichkeit gegenüber Gammastrahlen.

Empfindlichkeit für Gammastrahlen

Das ist anschaulich erklärbar: Das Füllgas in Ionisationskammern oder Zählrohren absorbiert wesentlich weniger Gammastrahlung als der Kristall im Szintillationszähler. Und im Vergleich zu Halbleiterdetektoren lassen sich Szintillatorkristalle mit viel größerem Volumen und entsprechend höherer Empfindlichkeit herstellen. Deshalb ist der Szintillationszähler für viele Einsatzbereiche, z.B. in der Nuklearmedizin, der am besten geeignete Strahlendetektor.

Szintillator für Neutronen

Mit dem Szintillationszähler lassen sich in ähnlicher Weise wie bei Ionisationskammer und Zählrohr auch Neutronen nachweisen. Dafür wurden Szintillatoren entwickelt, die geeignete Substanzen enthalten. So erzeugen langsame Neutronen durch die schon erläuterte Kernreaktion ${}^{10}_{5}B(n, \alpha)\,{}^{7}_{3}Li$ Alphateilchen, die dann im Szintillator Lichtemission auslösen. Für diese Messungen benutzt man Szintillatoren mit Borgehalt.
Schnelle Neutronen übertragen beim Zusammenstoß Bewegungsenergie auf Protonen, es entstehen Rückstoßprotonen. Als elektrisch geladene Teilchen können solche Protonen ionisieren und Lichtblitze in einem Szintillator auslösen, so daß damit der Nachweis schneller Neutronen möglich ist.
Schauen wir uns eine industriell hergestellte Szintillationssonde einmal genauer an. In Bild 28 ist eine solche Sonde im demontierten Zustand dargestellt. Am Kabel schließt unmittelbar ein Elektronikteil an, in dem sich der Spannungsteiler für die Hochspannung und die Eingangsstufe für die Impulssignale befinden. Für den Betrieb der Sonde ist eine Hochspannung von etwa 1000 V ein üblicher Wert. Auf den Sockel am Elektronikteil wird der Sekundärelektronenvervielfacher, ein luftleerer Glaskolben, der die Dynoden enthält, aufgesteckt, und auf die Fotokatode an der Stirnseite des Vervielfachers setzt man den Szintillator. Für den Nachweis von Gammastrahlen wird meist ein NaJ(Tl)-Kristall, mit Thallium aktiviertes Natriumjodid, benutzt.
Mittels Kappe und Feder werden die Teile stabil befestigt, und bei der Montage wird über die gesamte Anordnung die abgebildete Hülse geschoben, die dann allein das äußere Bild einer solchen betriebsfertigen Szintillationssonde bestimmt.

Halbleiterdetektoren

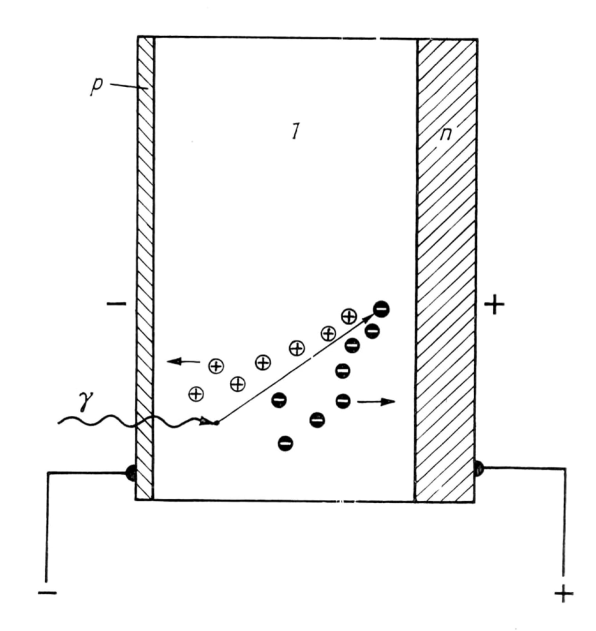
Grundlage: Halbleitertechnologie

In den beiden letzten Jahrzehnten haben wir eine radikale Umstellung der Elektronik auf Halbleiterbauelemente erlebt. Der Einsatz des Transistors und später der Mikroelektronik führte zu einer geradezu sensationellen Leistungssteigerung elektronischer Geräte, es sei hier nur an das heute verfügbare Rechnersortiment vom Taschenrechner bis zur EDVA erinnert.
Für diese neue Elektronik wurde als Ausgangsmaterial zunächst Germanium und heute überwiegend Silizium benutzt. Dabei war es notwendig, die Eigenschaften dieser Halbleitermaterialien intensiv zu erforschen und die technologischen Verfahren, die für die Verarbeitung erforderlich sind, zu entwickeln.
Diese breite technologische Basis stand dann auch für die Entwicklung der Halbleiterdetektoren für Kernstrahlung zur Verfügung, und so ist es gelungen, in den letzten 15 Jahren Halbleiterdetektoren mit immer besseren Eigenschaften herzustellen.
Welche physikalischen Vorgänge liegen nun diesen Strahlendetektoren aus Halbleitermaterial zugrunde?
Wir wollen die Wirkungsweise am Beispiel der sogenannten Lithium-Drift-Detektoren beschreiben, die heute überwiegend eingesetzt werden. In Bild 29 ist ein solcher Detektor schematisch dargestellt.

Struktur eines Halbleiterdetektors

In dem Block aus Halbleitermaterial, Germanium oder Silizium, befinden sich verschiedene Zonen, die sich durch ihre elektrische Leitfähigkeit unterscheiden. In der mit p bezeichneten Schicht erfolgt die Leitung des elektrischen Stromes durch positive Ladungsträger, während in der mit n gekennzeichneten Schicht elektrisch negative Ladungsträger die Stromleitung bewirken.
Das Gebiet zwischen diesen beiden Schichten hat einen hohen elektrischen Widerstand, der durch ein bestimmtes technologisches Verfahren erreicht wird: In dieses Gebiet werden durch einen Driftprozeß Lithiumionen eingebracht, die vorhandene Ladungsträger in diesem Gebiet gewissermaßen binden und damit für die Stromleitung ausschalten. So entsteht durch Verminderung der Ladungs-

29 Schematische Darstellung eines Lithium-Drift-Detektors
1 Zone geringer Leitfähigkeit (Lithium-Drift-Zone)



träger ein Bereich geringer elektrischer Leitfähigkeit bzw. mit hohem elektrischem Widerstand.

Hoher Innenwiderstand

Wenn wir dies beachten, läßt sich die Wirkungsweise des Halbleiterdetektors leicht verstehen. Sie entspricht weitgehend den Vorgängen in Ionisationskammern, und gelegentlich wird eine solche Anordnung auch Festkörper-Ionisationskammer genannt.

Der Anschluß der Betriebsspannung an den Detektor erfolgt so, daß der positive Pol an der n-Schicht und der negative an der p-Schicht liegt. Bei dieser Polung fließt nur ein verschwindend geringer Strom durch den Detektor, da in diesem Fall die Ladungsträger nicht in die hochohmige Driftzone in der Detektormitte hineingezogen werden.

Stromfluß durch Strahlung

Wenn nun bei der Messung Kernstrahlung in die Driftzone einfällt und absorbiert wird, so entstehen dort elektrische Ladungsträger, die eine Stromleitung auslösen. Somit führt jedes absorbierte Strahlungsquant oder -teilchen zu einem elektrischen Impuls in dem Stromkreis. Dieser Vorgang entspricht weitgehend der Impulsbildung in einer Ionisationskammer, nur muß man beachten, daß der Transport der Ladungsträger im Festkörper völlig anders abläuft als im Gasvolumen einer Ionisationskammer.

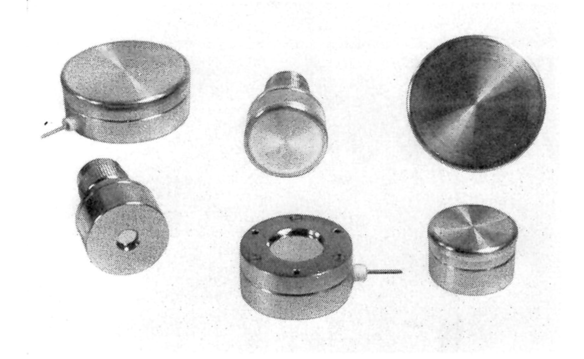
Es gibt aber noch einen ganz wesentlichen Unterschied zwischen diesen beiden Detektorarten. Und dieser Unterschied hat auch dazu beigetragen, daß man sich intensiv mit der Entwicklung von Halbleiterdetektoren beschäftigte: Im Festkörper entstehen bei jedem Absorptionsvorgang etwa zehnmal soviel Ladungsträger wie im Gasvolumen einer Ionisationskammer. Im Mittel werden zur Bildung eines Ladungsträgerpaares im Gas etwa 30 eV Energie verbraucht, während im Halbleitermaterial wegen der anderen Bindungsstruktur nur etwa 3 eV Energie erforderlich sind.

Wenn also beim Absorptionsprozeß eine bestimmte Energiemenge umgesetzt wird, dann können mit diesem Energiebetrag im Halbleiter mehr Ladungsträgerpaare erzeugt werden als in einem Gas. Die Impulshöhe im Halbleiterdetektor ist dementsprechend größer und gestattet damit eine genauere Energiemessung.

Energiemessung sehr genau

Gegenüber Szintillationsdetektoren ist bei Halbleiterdetektoren für Energiemessungen vorteilhaft, daß bei der Signalbildung der Umweg über die Lichtemission vermieden wird.

Somit konnte die Meßgenauigkeit für die Strahlungsenergie in den letzten Jahren



30 *Halbleiterdetektoren*

ganz entscheidend verbessert werden, und dadurch sind in der Forschung bedeutende Fortschritte erzielt und für die Strahlenmeßtechnik völlig neue Anwendungen erschlossen worden.
Vorteilhaft ist auch, daß sich Halbleiterdetektoren als äußerst robuste, stoßunempfindliche Meßfühler mit sehr geringen Abmessungen und in vielen Spezialausführungen konstruieren lassen, es sei nur auf den Einsatz in Raumflugkörpern hingewiesen.
Einige Detektortypen, die in der DDR produziert werden, sind in Bild 30 zusammengestellt. Es sind mit Lithium gedriftete Siliziumdetektoren, in der Fachliteratur als Si(Li)-Detektoren bezeichnet, und sie dienen hauptsächlich zur Messung von Alpha-, Beta- und niederenergetischer Gammastrahlung. Diese Detektoren werden überwiegend in Forschungsinstituten eingesetzt. An zwei Detektoren ist das Strahleneintrittsfenster erkennbar, bei den übrigen Detektoren ist es durch eine Metallkappe abgedeckt.

Filme für Kernstrahlung

Röntgenfilme sind allgemein bekannt, denn Röntgenaufnahmen sind heute ein unentbehrliches Hilfsmittel in der Medizin.

Kernstrahlung schwärzt Film

Ebenso wie durch Röntgenstrahlen werden auch bei Einwirkung von Kernstrahlung fotografische Schichten geschwärzt. Schließlich entspricht Röntgenstrahlung in physikalischer Hinsicht langwelliger Gammastrahlung.
Der Nachweis von Kernstrahlung durch Schwärzung von Fotoplatten ist mit dem Beginn unserer Kenntnis von der Radioaktivität eng verknüpft. Bereits 1896 fand *Becquerel*, daß Uransalze, die sich in unmittelbarer Nähe einer Fotoplatte befinden, in der fotografischen Schicht eine ähnliche Wirkung wie Licht hervorrufen. Nach dem Entwickeln zeigte das entstandene Bild schwarze Flecken, die unmittelbar auf die Lage der Uransalze im Verhältnis zur Fotoplatte schließen ließen.
Übrigens war damit bereits eine erste autoradiografische Aufnahme entstanden.

Autoradiografie

Radiografie

Man spricht von Autoradiografie, wenn das zu untersuchende Objekt selbst strahlt und seine Aktivitätsverteilung durch engen Kontakt mit der Filmschicht unmittelbar aufgenommen wird. Bei der Radiografie dagegen befindet sich das Untersuchungsobjekt zwischen einer Strahlenquelle und dem Film, und man erhält so eine Art Schattenbild von dem untersuchten Gegenstand.
In den Jahren nach *Becquerels* Entdeckung wurden radiografische Methoden wenig weiterentwickelt, Schwerpunkt der Entwicklung waren für Jahrzehnte solche Detektoren, die elektrische Signale abgeben und für die Erforschung der Kernstrahlung besser geeignet sind. Heute aber, in einer Zeit, in der immer noch neue Anwendungen für Radionuklide erschlossen werden, erhält auch der Strahlennachweis mit Fotoemulsionen wachsende Bedeutung.

Solche Emulsionen bestehen ähnlich den üblichen fotografischen Schichten im allgemeinen aus etwa 20% Gelatine und 80% Silberbromidkörnern, die in der Gelatineschicht eingebettet sind. Das Silberbromid ist in Form kleiner Kristalle in der Gelatine verteilt, und in diesen Kristallen werden unter dem Einfluß von Strahlen Zentren metallischen Silbers gebildet. Wenn genügend viel Silberatome entstanden sind, dann bewirkt das »Entwickeln« der Fotoschicht ein weiteres Anwachsen der Anzahl der Silberatome. Der verbleibende Rest Bromsilber wird in eine lösliche Verbindung überführt, dann durch Entwässern entfernt, und so entsteht aus dem latenten ein sichtbares Bild.

Was geschieht in der Fotoschicht?

Filmplaketten

Filmplaketten sind wohl heute das bekannteste Einsatzbeispiel für solche strahlenempfindlichen Fotoschichten. Diese Filmplaketten dienen zur Registrierung der Strahlendosis, die eine Person über einen längeren Zeitraum erhalten hat. Sie werden während der Arbeit an der Kleidung getragen und turnusmäßig an eine zentrale Überwachungsstelle zur Auswertung eingeschickt.

Kernspuremulsionen

Sehr erfolgreich werden Kernspuremulsionen im Forschungsbereich angewendet. Für die Untersuchung der Höhenstrahlung wie überhaupt zum Studium hochenergetischer Teilchen haben sie große Bedeutung erlangt. Emulsionspakete werden z. B. mit einem Ballon in einige 10000 m Höhe transportiert und dort längere Zeit der Höhenstrahlung ausgesetzt. Die Höhenstrahlspuren in den strahlenempfindlichen Schichten wertet man dann mit Spezialmikroskopen aus, und auf diese Weise sind wichtige experimentelle Daten über Elementarteilchen erhalten worden.

3 Meßsysteme für Kernstrahlung

Signalverarbeitung

Von den Detektoren werden elektrische Signale abgegeben, die natürlich ebensowenig direkt sichtbar oder wahrnehmbar sind wie die Kernstrahlung selbst.

Elektronik hilft Kerntechnik

Aber elektrische Signale können mit Hilfe der heute hochentwickelten Elektronik weiterverarbeitet werden, man kann die Meßwerte auf einem Bildschirm darstellen oder z. B. auf Papierstreifen ausdrucken lassen. Dafür stehen leistungsfähige Gerätesysteme zur Verfügung, denen wir uns im folgenden zuwenden wollen.

Wir werden erkennen, daß die beeindruckende Entwicklung von Mikroelektronik und Rechentechnik für manche Meßaufgaben zu fast perfekten Lösungen geführt hat. Und auch hier treffen wir auf dieses Grundproblem, das durch die neuen technischen Möglichkeiten entstand und heute den Produktivitätsfortschritt wesentlich prägt: Die Festlegung der Trennstelle bei der Verteilung der Aufgaben zwischen Mensch und automatisch arbeitendem Maschinensystem.

Geräte leisten immer mehr

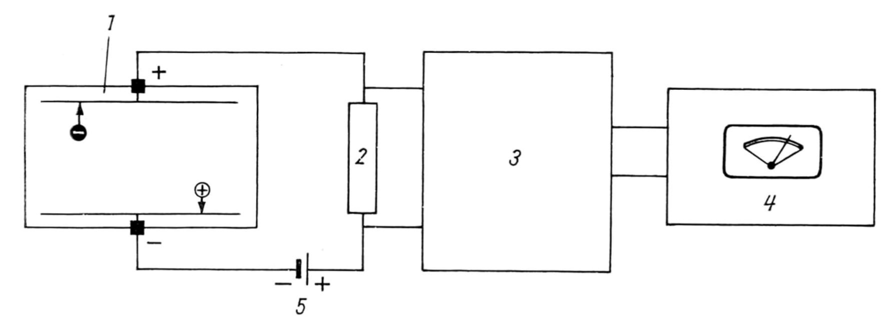
Diese Trennstelle bei der Arbeitsteilung zwischen Mensch und Maschine ist auch bei Kernstrahlungsmessungen derart in Richtung »Maschine« verschoben worden, daß dadurch in den letzten Jahren die gesamte Arbeitstechnologie auf diesem Gebiet grundlegend verändert wurde. Heute rechnet und entscheidet oft das Gerätesystem, die Maschine, alles, was nach vorgegebenen Regeln abgearbeitet werden kann, während dem Operator – neben der Betreuung des Systems – nur die »echten« Entscheidungen vorbehalten bleiben.

Systeme mit Ionisationskammern

Ionisationskammern, die einen Signalstrom abgeben, sind besonders für einige spezielle Meßaufgaben gut geeignet.

So werden diese Kammern häufig in Strahlenschutzgeräten eingesetzt, und Anlagen zur Flächenmassemessung sind fast ausschließlich mit Ionisationskammern ausgerüstet. Diese Einzweckgeräte sind aber besonders unter dem Blickwinkel der Anwendung interessant und werden in den betreffenden Abschnitten erörtert. Deshalb soll hier der elektronische Teil dieser Geräte nur kurz an Hand einer schematischen Darstellung erläutert werden.

Bild 31 zeigt ein solches vereinfachtes Schema, das die Ionisationskammer, den



31 Meßanordnung mit Ionisationskammer
1 *Ionisationskammer;* 2 *Arbeitswiderstand;* 3 *Verstärker;* 4 *Anzeigeinstrument;* 5 *Spannungsquelle*

Verstärker und ein Anzeigeinstrument enthält. Von der Kammer gelangt der Signalstrom, dessen Stromstärke der Strahlungsintensität proportional ist, zum Verstärkereingang. Dabei treten im allgemeinen sehr geringe Stromstärken von etwa 10^{-14} bis 10^{-8} A auf. Diese Signalströme werden in dem Verstärker soweit verstärkt, daß an den Verstärkerausgang z. B. ein Anzeigeinstrument angeschlossen werden kann. Der Zeigerausschlag am Instrument ist dann ein Maß für die Strahlungsintensität. Die Instrumentenskale wird für die einzelnen Anwendungen speziell geeicht.

Signale aus kleinsten Strömen

Der verstärkte Signalstrom kann natürlich auch auf dem Papierstreifen eines Schreibers registriert werden. Bei Geräten zur Flächenmassemessung wird das Stromsignal zum Teil unmittelbar zur Steuerung von Produktionsprozessen benutzt.

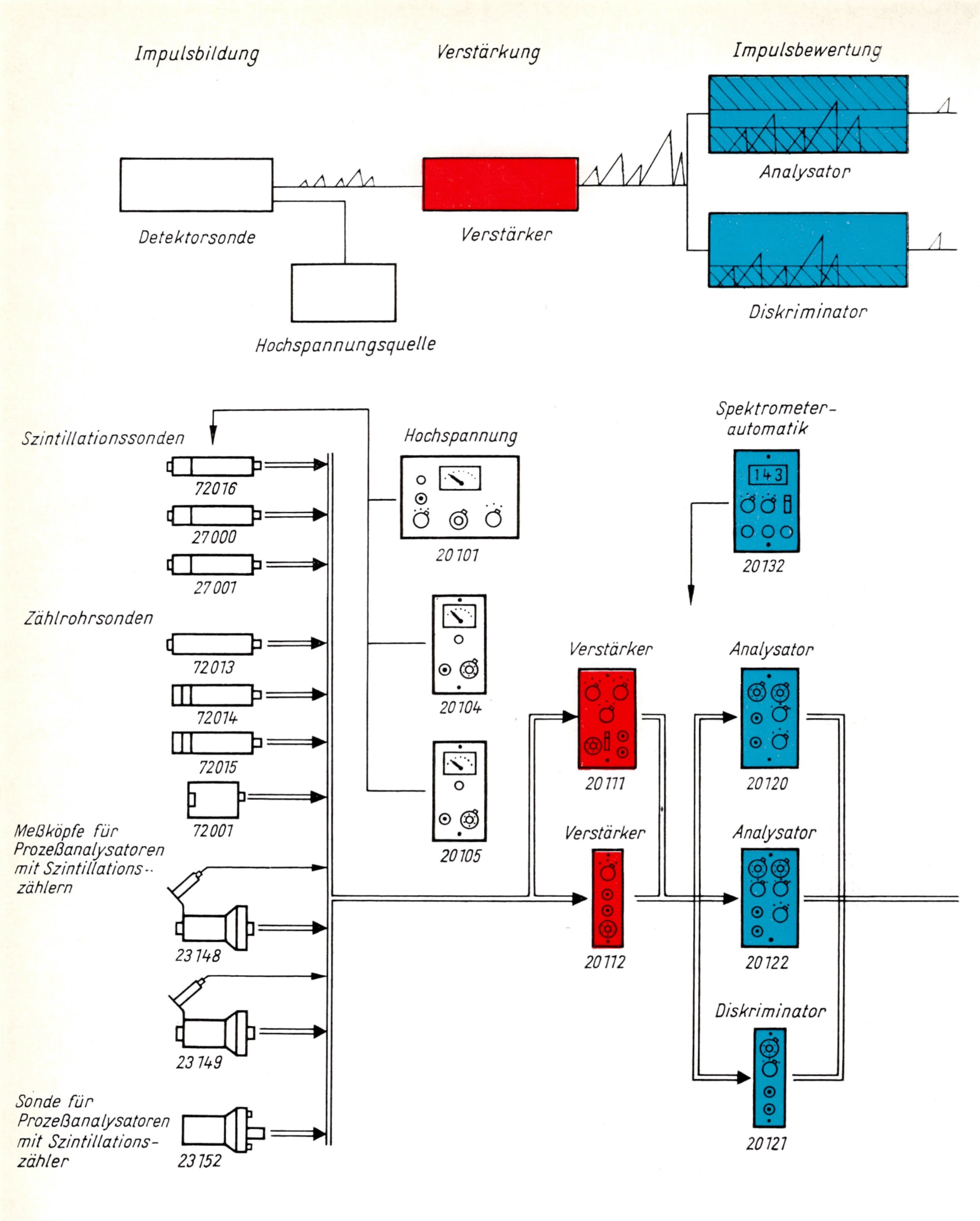
Impulsverarbeitung

Wenn wir ein kernphysikalisches Laboratorium besichtigen, so fallen uns die vielen elektronischen Meßgeräte auf. Natürlich sind solche Laboratorien je nach ihren Aufgaben unterschiedlich ausgerüstet, der hohe Anteil an elektronischer Meßtechnik ist aber meist charakteristisch. Das hat einen einfachen Grund: Nur mit »elektronischer« Hilfe erhalten wir Informationen von den Strahlen, die in diesen Laboratorien untersucht werden. Es wurde schon erläutert, daß Zählrohre, Szintillationszähler und Halbleiterdetektoren Impulssignale abgeben, die erst nach elektronischer Verarbeitung als Meßwerte wahrnehmbar sind. Dabei durchlaufen diese Impulse in den Geräten nacheinander mehrere Verarbeitungsstufen, und wir wollen uns nun einen Einblick in diese Vorgänge verschaffen.

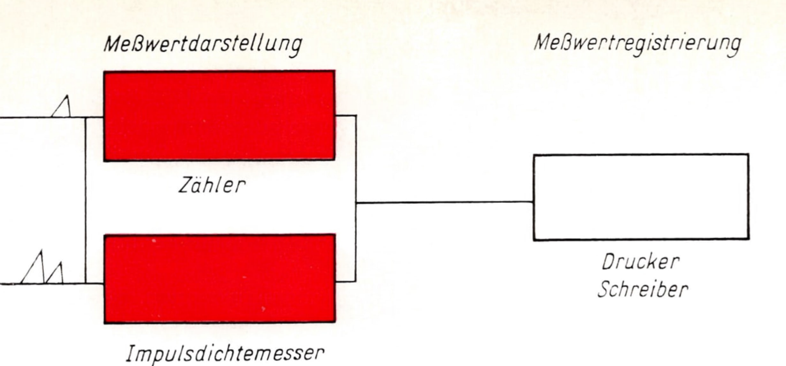
Warum so vie Elektronik?

Von den vielen unterschiedlichen Geräten können wir natürlich nur wenige Beispiele anführen und an diesen das Wesentliche erläutern. Zunächst muß man zwischen kompakten Geräten, die speziell für eine bestimmte Meßaufgabe konstruiert worden sind, und den aus Funktionseinheiten bestehenden Gerätesystemen unterscheiden. In diesem Abschnitt wollen wir ein Gerätesystem vorstellen (s. Tafel S. 62), weil durch die Aufteilung in Funktionsblöcke die einzelnen Stufen der Signalverarbeitung besonders übersichtlich dargestellt werden können. Ähnliche Systeme werden in vielen Ländern hergestellt. Einige dieser Systeme sind besonders für ein direktes Zusammenwirken mit einem Rechner ausgelegt – diese Betriebsweise ist bei der Lösung komplizierter Forschungsaufgaben erforderlich. Den folgenden Ausführungen legen wir ein Gerätesystem zugrunde, das hauptsächlich für Isotopenlaboratorien vorgesehen ist und in der DDR hergestellt wird.

Signale durchlaufen Funktionsblöcke



Tafel. System für die Analysen- und Strahlenmeßtechnik des VEB RFT Meß-elektronik »Otto Schön« Dresden



Ergebnisdrucker
23 142

Impuls-Zeitzähler
1473102
51 021

Zähler
1420
51 038

Meßwertdruckersystem
S-3292.000

Digitaler Impulsdichte-
messer
141
20 148

Kleinrechnersystem KRS 4200

Linearer Impuls-
dichtemesser
20 146

Impulsdichtemesser
20 149

Schreiber 20 013

In dem Blockschema sind oben die wichtigsten Funktionsbausteine einer Impulsverarbeitungskette zusammengefaßt. Die eingezeichneten Impulsgruppen kennzeichnen die Verarbeitung der Impulse in den einzelnen Funktionsbausteinen. Darunter sind die wichtigsten Systemelemente zusammengestellt, die sich zu verschiedenartigen Meßanordnungen kombinieren lassen. Damit ist es möglich, für eine Vielzahl von Anwendungen mit einer relativ geringen Anzahl von Grunderzeugnissen spezielle Meßplätze bereitzustellen. Wegen dieses Vorteils sind solche Kombinationssysteme neben den Einzweckgeräten heute in der Kernstrahlungsmeßtechnik weit verbreitet.

Wir wollen uns nun dem Signalfluß in dem Gerätesystem zuwenden. Dazu ist es am besten, ab und zu einen Blick auf die Tafel zu werfen.

Das elektrische Signal, das die Information über die zu messende Strahlung enthält, wird im Detektor erzeugt und von der Detektorsonde in Form von Impulsen

Meßsonden

abgegeben. Als Detektoren werden in dem vorliegenden System Zählrohre und Szintillationszähler benutzt, die in Zählrohr- und Szintillationssonden eingebaut sind. Die Sonden enthalten neben mechanischen Teilen, die zum Schutz und zur Halterung des Detektors notwendig sind, ebenfalls einen elektronischen Teil, in dem die vom Detektor abgegebenen Impulse an den nachfolgenden Verstärker angepaßt werden. Zu den Szintillationssonden gehören in dem vorliegenden System auch drei spezielle Sonden, die zum Einsatz in der Analysenmeßtechnik (vgl. S. 84 und 90) vorgesehen sind.

Hochspannung

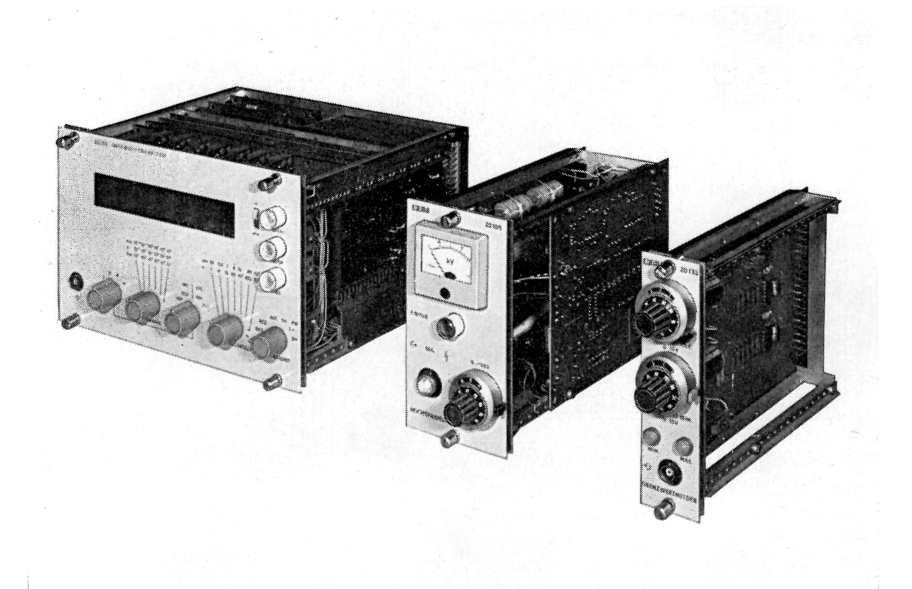
Die Detektoren sind erst betriebsbereit, wenn die Hochspannung angelegt wird. Dazu stehen in dem System drei verschiedene Hochspannungsquellen zur Verfügung.

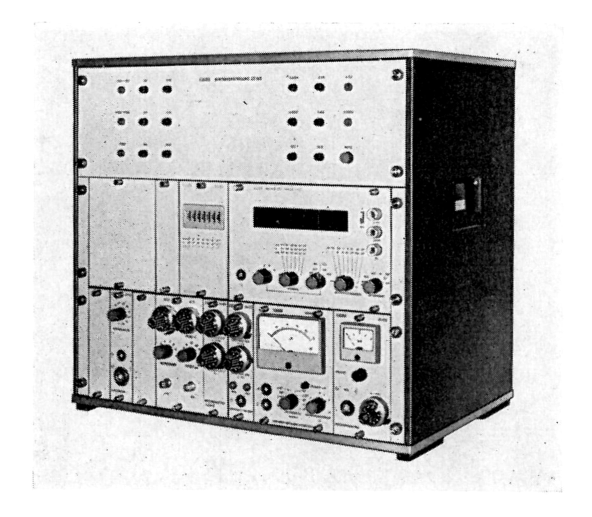
Wenn wir nun den Weg der Signalimpulse verfolgen, so gelangen diese zunächst aus der Sonde in einen Verstärker. In diesem werden die Impulsamplituden so weit vergrößert, daß die Impulse in der nachfolgenden Elektronik weiterverarbeitet werden können.

Verstärker

In dem System stehen dafür zwei Verstärker zur Verfügung, die für unterschiedliche Aufgaben vorgesehen sind.

32 Funktionseinheiten für Kernstrahlungsmeßplätze. Von links nach rechts: Impuls-Zeit-Zähler, Hochspannungsquelle, Grenzwertmelder





33 Aus Funktionseinheiten zusammengestellter Meßplatz

Der Verstärker 20112 wird hauptsächlich dann eingesetzt, wenn nur die Impulszahl registriert werden soll, während der Verstärker 20111 speziell für die Analyse der Impulsamplituden geeignet ist.

Diskriminator

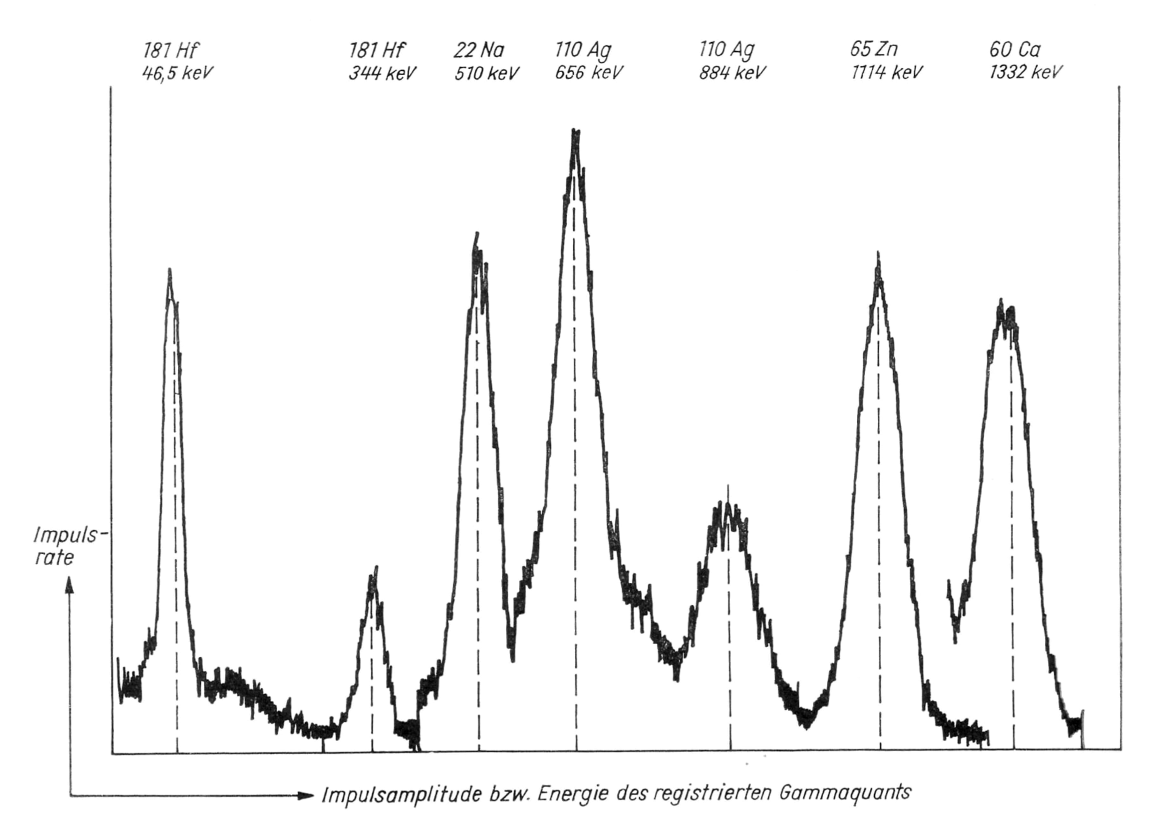
Nach dem Verstärker gelangen die Impulse entweder auf einen Diskriminator oder einen Analysator. Die Wirkungsweise dieser Einheiten soll mit Hilfe des Blockschemas erläutert werden.
Im Diskriminator wird durch elektronische Schaltungen eine Schwelle eingestellt, die bewirkt, daß alle Impulse, deren Amplituden über dieser Schwelle liegen, durchgelassen werden, während alle Impulse, deren Amplituden kleiner als die Diskriminatorschwelle sind, nicht zum Ausgang gelangen, also unterdrückt werden. Der Diskriminator wird in die Meßkette eingesetzt, wenn man nur die Impulszahl je Zeiteinheit registrieren will, also insbesondere bei Messungen mit Zählrohrsonden. Ist zusätzlich die Impulsamplitude auszuwerten, dann fügt man stattdessen die Analysatoreinheit in die Meßkette ein (Bild 33).

Analysator

Analysatoren unterscheiden sich vom Diskriminator dadurch, daß in ihnen zwei Schwellen festgelegt werden, deren Funktionen aus dem Blockschema ersichtlich sind. Die untere Schwelle wirkt ebenso wie beim Diskriminator – es werden nur solche Impulse durchgelassen, deren Amplituden den Schwellwert übersteigen. Zusätzlich wird aber jeder Impuls einem zweiten Kriterium unterworfen – er kann den Analysator nur dann passieren, wenn seine Impulsamplitude ebenfalls unterhalb des oberen Schwellwerts liegt. Es werden also auch alle Impulse unterdrückt, deren Amplituden größer sind als die obere Analysatorschwelle. Die beiden Schwellwertbegrenzungen wirken damit für die Impulsamplituden wie ein »Durchlaßfenster«.
Wenn man dieses Fenster nacheinander über den gesamten Amplitudenbereich verschiebt und jeweils die durchgelassenen Impulsraten registriert, so erhält man die Amplitudenverteilung, ein Spektrum, wie es in Bild 34 dargestellt ist.

Spektrometer-automatik

Mit einer speziellen Funktionseinheit, der Spektrometerautomatik, kann das Analysatorfenster automatisch über den gesamten Amplitudenbereich verschoben werden, so daß damit eine automatische Aufnahme des Amplitudenspektrums möglich wird.
Die beiden Analysatoreinheiten des Systems unterscheiden sich durch die Angabe des Schwellwertes: Bei dem Analysator 20120 wird als Kanallage der untere Schwellwert angegeben, während sich beim Analysator 20122 diese Angabe auf die Fenstermitte bezieht.
Schließlich werden die verstärkten und im Analysator selektierten Signalimpulse auf die Eingangsstufen der Impulszähler oder Impulsdichtemesser geleitet.



34 Energiespektrum für Gammastrahlung. Die gemessene Amplitudenverteilung entspricht der Energieverteilung der registrierten Gammaquanten

Impulszähler

Diese Funktionseinheiten dienen der Anzeige des Meßergebnisses, jetzt werden die vom Detektor abgegebenen Impulse als Meßwerte erstmals sichtbar.
Der Impuls-Zeitzähler 51021 enthält einen Zeitgenerator. Während der Meßzeit summiert der Zähler alle eintreffenden Impulse, und dieser Zählvorgang wird nach Ablauf der vorgewählten Meßzeit durch ein Stoppsignal vom Zeitgenerator automatisch beendet. Das Zählergebnis, also die Summe der während der Meßzeit angekommenen Impulse, wird dann auf einer siebenstelligen Ziffernanzeige als Zahlenwert dargestellt.
Der Zähler gestattet auch andere Betriebsarten, so z. B. die Begrenzung der Meßzeit durch eine Impulsvorwahl. In diesem Fall wird eine gewünschte Impulszahl vorgewählt, und nach Erreichen dieser Impulszahl erfolgt automatisch ein Abstoppen des Meßvorgangs.
Der Zähler 51038 ist speziell für die Erfordernisse der Analysenmeßtechnik ausgelegt. In diesem Fall ist nur eine vierstellige Ziffernanzeige erforderlich.
Die Impulsdichtemesser sind neben den Zählern eine zweite Gruppe von Funktionseinheiten, die zur Anzeige des Meßergebnisses dienen. Während bei den Zählern die Meßzeit in weiten Grenzen beliebig vorgewählt werden kann, messen die Impulsdichtemesser die Impulszahl während einer bestimmten Zeiteinheit, also je Sekunde oder in manchen Geräteausführungen auch je Minute. Dieses Ergebnis erhält man vom Zähler auch, wenn man das Zählergebnis durch die Meßzeit dividiert. Die Impulsdichtemesser aber sind in ihrer Konzeption bestimmten Meßaufgaben besonders gut angepaßt.

Impulsdichtemesser

Der digitale Impulsdichtemesser 20148 hat eine dreistellige Ziffernanzeige, also eine digitale Anzeigeeinheit. Die Meßzeit ist zwischen 0,1 s und 100 s einstellbar,

und nach Ablauf der Meßzeit wird die Impulsdichte in Impulsen je Sekunde auf der Ziffernanzeige angegeben.
Ein anderes Anzeigeprinzip ist im linearen Impulsdichtemesser 20146 realisiert: Hier wird ein Meßinstrument benutzt und der Meßwert am Zeigerausschlag auf einer Skale abgelesen. Das ist gegenüber Zählern vorteilhaft, wenn die Strahlungsintensität am Meßort schwankt, denn dann kann man diese Schwankungen unmittelbar durch die Wanderung des Instrumentenzeigers verfolgen.
Der Impulsdichtemesser 20149 schließlich ist besonders für den Einsatz in Analysenmeßgeräten konstruiert, er hat kein Meßinstrument, die Meßwerte werden einem Schreiber oder anderen Registriergeräten zugeführt.

Meßwertschreiber

An Zählern und Impulsdichtemessern kann man den Meßwert ablesen; falls er aber aufbewahrt werden soll, muß er vom Operator, der das Gerät bedient, in einem zusätzlichen Arbeitsgang aufgeschrieben werden. Das ist jedoch bei großen Datenmengen sehr aufwendig, und so wurden Registrier- und Auswertesysteme entwickelt, die von den Zählern und Impulsdichtemessern die Meßwerte übernehmen.
Für den Anschluß an die Impulsdichtemesser ist ein Schreiber vorgesehen. In dem Schreiber wird auf einem Papierstreifen die gemessene Impulsdichte als Meßkurve aufgeschrieben.

Meßwertdrucker

Das Ausdrucken von digitalen Meßergebnissen, also von Zahlenwerten, erfolgt entweder mit einem Ergebnisdrucker oder dem Meßwertdruckersystem S-3292.000 des Kombinats VEB Funkwerk Erfurt. Der Ergebnisdrucker ist für die Registrierung bei langsamer Meßwertfolge vorgesehen, während das aufwendigere Meßwertdruckersystem mit maximal 5 Drucken je Sekunde etwa zehnmal schnellere Meßwertfolgen ausdrucken kann.

Rechneranschluß

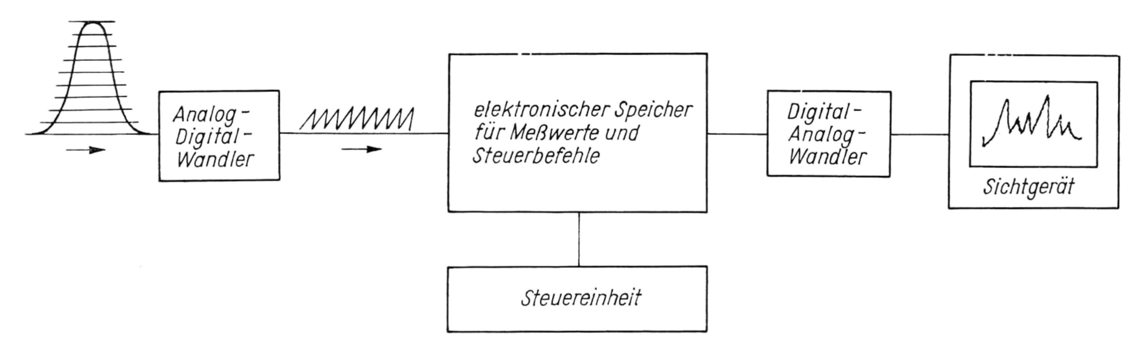
Eine grundlegende Erweiterung der Meßanordnung erfolgt bei Anschluß eines Rechners, in unserem Fall des Kleinrechnersystems KRS 4200. Damit wird eine völlig neue Leistungsstufe erreicht: Das Meßsystem registriert nicht nur, sondern es verarbeitet die Meßwerte nach einem vorgewählten Rechenschema.
Auf diese Weise erhält man aus den Primärdaten abgeleitete Resultate, also z. B. die Aktivität der gemessenen Radionuklide oder bei Analysenverfahren die gesuchten Elementkonzentrationen. Die gesamte Zwischenrechnung wird von dem Gerätesystem ausgeführt, und der Vorteil besteht nicht nur im Einsparen manueller Rechenarbeit, sondern auch in einer für das Verfahren oft entscheidenden Beschleunigung des gesamten Meßvorgangs einschließlich der Auswertung. Beispiele dafür werden an anderer Stelle erläutert, in diesem auf die Elektronik beschränkten Abschnitt sollte lediglich ein Einblick in den prinzipiellen Aufbau komplexer Meßsysteme vermittelt werden.

Vielkanalanalysatoren

Neben der Impulszählung ist das Messen der Impulsamplituden eine wichtige Aufgabe der Kernstrahlungsmeßtechnik. Das ist mit der in der Tafel dargestellten Meßkette möglich, wenn man in diese Meßkette eine Analysatoreinheit einfügt.

Ziel: Meßzeit sparen

Diese Anordnung hat aber einen wesentlichen Nachteil: Sie arbeitet zu langsam, denn es werden immer nur diejenigen Impulse durch den Analysatorkanal hindurchgelassen, deren Impulsamplituden dem gerade eingestellten Analysatorfenster entsprechen – alle anderen Impulse gehen für die Messung verloren. Und das vollständige Spektrum erhält man erst, nachdem der Analysatorkanal schrittweise über den gesamten Amplitudenbereich verschoben wurde. Das beansprucht im allgemeinen viele Minuten Zeit.
Es sind deshalb Meßgeräte, die Vielkanalanalysatoren, entwickelt worden, die sämtliche ankommenden Impulse gleichzeitig nach ihrer Amplitude sortieren und messen. Da diese Geräte heute für die Kernstrahlungsmeßtechnik sehr



35 Grundstruktur eines Vielkanalanalysators

Baugruppen im Vielkanalanalysator

wichtig sind, soll hier ihre grundsätzliche Wirkungsweise kurz erläutert werden. Der schematische Aufbau eines Vielkanalanalysators ist aus Bild 35 ersichtlich. Darin sind nur die für ein prinzipielles Verständnis notwendigen Einheiten eingezeichnet, und zwar der Analog-Digital-Wandler, der Speicher, die Steuereinheit und die Einheit zur Bildschirmwiedergabe mit Digital-Analog-Wandler und Bildschirm.

Bis zum Verstärkerausgang entspricht die Meßkette im wesentlichen der in der Tafel dargestellten Anordnung. Allerdings werden als Strahlendetektoren auch häufig Halbleiterdetektoren benutzt, da ihre Leistungsfähigkeit bei Energiemessungen erst mit Vielkanalanalysatoren völlig ausgeschöpft werden kann.

Nach dem Verstärker wird das Amplitudenspektrum ähnlich der Anordnung in der Tafel noch durch eine Diskriminatorschwelle begrenzt, und dann gelangen die Impulse auf den Eingang des Analog-Digital-Wandlers. Der Name deutet die Funktion dieser Einheit bereits an: Es wird ein analoges Signal, die Höhe der Impulsamplitude, in ein digitales Signal, und zwar in eine Impulsfolge, umgewandelt.

Analog-Digital-Wandler

Das ist in dem Schema durch die Darstellung der Impulse am Eingang und Ausgang des Analog-Digital-Wandlers angedeutet. Die Impulsamplitude des Eingangsimpulses wird in der Funktionseinheit in einer speziellen elektronischen Schaltung gewissermaßen »zerhackt«, und es entsteht eine Impulsgruppe für jede »zerhackte« Impulsamplitude, wobei die Anzahl der Impulse in dieser Gruppe der Impulshöhe des Eingangsimpulses proportional ist.

In dieser neuen Form kann nun das Signal, das die Impulshöhe repräsentiert, in der Meßanordnung weiterverarbeitet werden. Es gelangt in den Speicher.

Meßwertspeicher

Dieser elektronische Speicher enthält Speicherplätze, die den einzelnen Meßkanälen im Vielkanalanalysator entsprechen. Jede Speicherzelle ist durch eine Adresse gekennzeichnet. Damit ist es möglich, die Impulsgruppen, die vom Analog-Digital-Wandler kommen, nach folgendem Verfahren in den Speicher einzuordnen: Als Adresse wird die Zahl der Impulse in der Gruppe benutzt, und es wird ein Ereignis jeweils auf demjenigen Speicherplatz abgespeichert, der durch die betreffende Adresse gekennzeichnet ist.

Wieviel Platz ist im Speicher?

Ein Speicherplatz kann aber nur eine begrenzte Zahl von Ereignissen aufnehmen. Der Fachausdruck für dieses Fassungsvermögen ist »Speicherkapazität«. Diese Zahl ist bei elektronischen Speichern sehr groß, ein üblicher Wert für Vielkanalanalysatoren ist eine Million Ereignisse je Kanal.

Bei Vielkanalanalysatoren werden überwiegend Speicher mit 1024 oder 4096 Kanälen eingesetzt, wobei die Wahl der letzten Ziffern durch den technischen Aufbau der Speicher bedingt ist. Für 1024 Speicherzellen wird die Abkürzung 1 k benutzt, so daß man von 1-k- oder 4-k-Speichern spricht.

Die Schaltvorgänge beim Speichern der Impulse werden so wie der gesamte

Arbeitsablauf im Vielkanalanalysator von der Steuereinheit ausgelöst. Über diese Einheit wird die jeweilige Betriebsart des Gerätes durch Steuerimpulse realisiert, sie ist gewissermaßen die Schalt- und Befehlszentrale für das gesamte Meßsystem.

Steuereinheit

Die Meßergebnisse aus dem Vielkanalanalysator gibt man z. B. durch einen Meßwertdrucker aus. Dann werden nacheinander die einzelnen Speicherzellen abgefragt und ihr Speicherinhalt nach Abschluß des Meßvorganges ausgedruckt. Auf dem Papierstreifen erscheinen dann für jeden Kanal zwei Zahlen, und zwar einmal die Adresse der jeweiligen Speicherzelle und zum anderen die Zahl der gespeicherten Ereignisse bzw. die Impulszahl.

Meßwertausgabe

In Bild 35 ist zur Darstellung des Meßergebnisses ein Sichtgerät eingezeichnet, das fast immer im Vielkanalanalysator mit eingebaut ist. Um das Spektrum auf dem Bildschirm darstellen zu können, muß das Meßergebnis von der digitalen Form wieder in Analogsignale, also Spannungswerte, zurückverwandelt werden, denn der Elektronenstrahl in der Bildröhre wird mit Spannungssignalen gesteuert. Diese Umwandlung erfolgt in einem Digital-Analog-Wandler.

Ergebnisse auf dem Bildschirm

Nach Anlegen der entsprechenden elektrischen Spannung an die Ablenkelektroden in der Bildröhre entsteht dann auf dem Schirm folgendes Bild: Der Inhalt jedes Kanals wird durch einen Punkt gekennzeichnet, dessen x-Koordinate durch die Adresse, die Impulsamplitude, und dessen y-Koordinate durch den Speicherinhalt, die Impulszahl, festgelegt ist. Denkt man sich die einzelnen Punkte durch einen Kurvenzug verbunden, so erhält man das Impulshöhenspektrum in völliger Übereinstimmung mit der Darstellung in Bild 34.

Die Fortschritte der Gerätetechnik in den letzten 10 Jahren sind gerade am Beispiel der Vielkanalanalysatoren sehr augenfällig. Während 1960 zur elektronischen Realisierung der oben dargestellten Grundfunktionen noch ganze Schränke benötigt wurden, kann heute mit Tischgeräten eine Vielzahl zusätzlicher Aufgaben gelöst werden – ein sichtbarer Fortschritt bei der Entwicklung elektronischer Bauelemente, ein Ergebnis der Miniaturisierung durch Mikroelektronik.

Geräte werden kleiner

Der gesamte Leistungsumfang moderner Analysatorsysteme kann hier nicht dargestellt werden, wir wollen aber mit einigen Beispielen einen Einblick vermitteln.

Die x-Achse auf dem Bildschirm ist zunächst in Kanälen geeicht; diese Angabe genügt aber für die Meßtechnik nicht, man muß auf der x-Achse die Energiewerte angeben und nicht die Kanäle, denn als Meßergebnis wird ja im allgemeinen das Energiespektrum gesucht.

Eichung der Energieskale

Wenn man eine solche Energieeichung der x-Achse in einem Diagramm von Hand vornimmt, so sucht man dafür zunächst zwei möglichst scharfe Linien im Spektrum, von denen bekannt sein muß, zu welchem Nuklid sie gehören. Dann nimmt man für diese Linien die zugehörigen Energiewerte aus einer Tabelle, in der für die Radionuklide die emittierten Quantenenergien zusammengestellt sind. Aus der Zuordnung dieser Energiewerte zu den ausgesuchten Linien und durch entsprechende Markierung der x-Achse kann nun durch Rechnung die gesamte Energieskale ermittelt werden, und man erhält als Resultat, welche Strahlungsenergie den einzelnen Kanälen entspricht.

Dieser gesamte Vorgang wird heute von modernen Geräten weitgehend automatisch durchgeführt. Natürlich müssen die beiden Energiewerte für die Eichung vom Operator noch in das System eingegeben werden, doch dann übernimmt das Gerät alles Weitere selbst.

Für die Dateneingabe erscheint auf dem Bildschirm eine senkrechte Markierungslinie, die vom Operator mit einem Drehknopf längs der x-Achse verschoben werden kann. Diese Markierungslinie bringt der Operator mit der Eichlinie im Spektrum zur Deckung, und dann wird der zugehörige Energiewert in das Gerät eingegeben. Für eine zweite Eichlinie wiederholt man anschließend diesen Vorgang. Dann berechnet das Gerät die Energieskale für die x-Achse selbst,

Gesucht werden Radionuklide

und die Zahlenwerte für die Energie werden auf dem Sichtgerät mit ausgeschrieben. Wenn jetzt der Operator die Markierungslinie auf eine beliebige Stelle im Spektrum legt, so kann er den zugehörigen Energiewert direkt auf dem Bildschirm – meist über dem Diagramm angeordnet – ablesen.

Eine andere häufige Meßaufgabe ist das Ermitteln von Radionukliden aus dem gemessenen Gammaspektrum. Dafür muß man die Energiewerte der ausgeprägten Linien im Spektrum suchen und dann mit Hilfe von Tabellen feststellen, zu welchen Radionukliden diese Linien gehören.

Dieser Vorgang wird heute durch leistungsfähige Geräte sehr vereinfacht. In dem Speicher, der nicht nur für die Datensammlung benutzt wird, sind bei diesem Meßverfahren die markanten Linien für die wichtigsten Radionuklide eingespeichert, und durch Vergleich mit den Linien im gemessenen Spektrum stellt nun das Gerät selbständig fest, welche strahlenden Nuklide in der Probensubstanz vorhanden sind. Auf dem Bildschirm werden dann die ermittelten Radionuklide unmittelbar durch Schriftzeichen angezeigt.

Der Operator hat bei diesem Meßverfahren auch die Möglichkeit, die Spektrallinien der eingespeicherten Elemente als Markierungslinien darzustellen. Damit kann der Operator selbst kontrollieren, ob die Linien für ein bestimmtes Nuklid im Spektrum vorhanden sind oder fehlen.

Die angeführten Beispiele sollten einen Einblick in die Arbeitsvorgänge in modernen kernphysikalischen Laboratorien vermitteln, und sie sollten demonstrieren, wie heute Vielkanalanalysatoren auch Rechenaufgaben zur Lösung von Meßproblemen übernehmen, wobei die Rechenprogramme meist in einfacher Weise durch Betätigung einer Taste am Gerät ausgelöst werden.

Rechneranschluß

Dennoch reichen für umfangreiche Meßaufgaben die Rechenabläufe, die gegenwärtig in diesem Analysator realisiert werden können, nicht aus. Man hat deshalb oft die Vielkanalanalysatoren mit Rechnern kombiniert. Rechner mittlerer Leistung, die nur etwa die Größe eines Geräteeinschubs haben, ergeben für die Kombination auch konstruktiv befriedigende Lösungen.

Die Möglichkeiten des Systems werden durch den Anschluß eines Rechners ganz wesentlich erweitert. Jetzt kann der Benutzer auch selbst hergestellte Meß- und Auswerteprogramme in das System eingeben, denn der Rechner ist frei programmierbar. Damit werden auch Lösungen für die unabsehbare Zahl höchst unterschiedlicher Meßaufgaben möglich, die z. B. bei Forschungsarbeiten neu entstehen und von der Geräteindustrie nicht berücksichtigt werden können. Ein allerdings recht einfaches Beispiel soll hier zur Illustration erläutert werden.

Aktivitätsmessung

Es besteht oft die Aufgabe, die Aktivität eines Radionuklids in einer Probensubstanz zu bestimmen. Die Aktivität kennzeichnet die Anzahl der Kernzerfälle je Zeiteinheit; gemessen wird aber nur ein Bruchteil der Strahlung, die dabei entsteht. Dieser Bruchteil hängt entsprechend der jeweiligen Meßanordnung von mehreren Faktoren ab, und die Berücksichtigung dieser Faktoren bei der Ermittlung des Meßergebnisses erfordert bereits erheblichen Rechenaufwand. In jeder konkreten Meßanordnung wirken sich die einzelnen Einflußgrößen unterschiedlich auf den Meßwert aus; hier sollen zur Darstellung des Prinzips nur einige wichtige Einflußfaktoren angeführt werden.

Rechner korrigieren

Zunächst muß man berücksichtigen, daß beim Zerfall eines bestimmten Radionuklids durchaus nicht in jedem Fall die gleiche Strahlung emittiert wird, sondern daß bei einem Zerfallsschema mit mehreren Möglichkeiten für den Kernzerfall eine bestimmte Strahlung nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auftritt. Deshalb muß der gemessene Wert für die Strahlung mit einem Faktor, der diese Zerfallswahrscheinlichkeit berücksichtigt, korrigiert werden.

Weiterhin wird vom Detektor natürlich nur ein kleiner Teil des gesamten Raumwinkels erfaßt, in den die Strahlung ausgesendet wird. Diesen Umstand berücksichtigt man mit einem sogenannten Geometriefaktor, mit dem das Meßergebnis ebenfalls korrigiert werden muß.

Der Detektor selbst hat für unterschiedliche Gammaenergien auch verschiedene Empfindlichkeiten, und zwar sinkt diese Empfindlichkeit im allgemeinen mit wachsender Energie der Gammaquanten, weil bei höheren Energiewerten weniger Gammastrahlung im Detektor absorbiert wird. Diese energieabhängige Detektorempfindlichkeit führt zu einem weiteren Korrekturfaktor, mit dem das Meßergebnis bei der jeweiligen Strahlungsenergie zu multiplizieren ist.
Und schließlich ist bei kurzlebigen Radionukliden auch die Abklingzeit zu berücksichtigen, die Aktivität des Radionuklids bleibt in manchen Fällen sogar während der kurzen Meßzeit nicht konstant.
So erhält man durch Korrektur der gemessenen Strahlungsintensität mit den angeführten Faktoren, die im Rechner automatisch nach einem eingegebenen Rechenprogramm erfolgt, sofort den richtigen Zahlenwert für die gesuchte Radioaktivität in der Probensubstanz.
Mit den wenigen Beispielen sollte ein Eindruck vermittelt werden, wie stark heute die moderne Elektronik und Rechentechnik die Nutzung der Ergebnisse der Kernforschung beeinflussen.
Erst durch technische Entwicklungen in anderen Bereichen werden Forschungsergebnisse der Kernphysik breitenwirksam, wobei eine Wechselwirkung erfolgt: Neue technische Hilfsmittel fördern die nutzbringende Anwendung der Ergebnisse der Kernphysik – dadurch können die technischen Mittel in anderen Bereichen verbessert werden. Das schließlich unterstützt auch die Leistungssteigerung auf dem Gebiet der Elektronik, und rückwirkend beschleunigen verbesserte Meßsysteme wiederum die kernphysikalische Forschung.

4 Radionuklide für die Industrie

»Blick« durch Kesselwände

Eine schwere Entscheidung

Der Leiter der Konstruktionsabteilung überprüft noch einmal den Vorschlag. In die Konstruktionszeichnung für den Säurebehälter ist das Warnzeichen »Vorsicht, radioaktiv« eingetragen. Der Konstrukteur behauptet, das Problem sei nicht anders zu lösen. Der Abteilungsleiter überdenkt nochmals die Argumentation.

Der neue Säurebehälter, ein Metallkessel von 5 m Höhe und 2 m Durchmesser, muß mit einer Meßvorrichtung für die Füllhöhe ausgerüstet werden. Der Füllstand der Säure darf im Betrieb nur zwischen 3 m und 4 m schwanken – so sind Zufluß und Abfluß zu regulieren. Schwierig wird die Aufgabe dadurch, daß der Kessel wegen der Dämpfe hermetisch abgeschlossen ist. Man kann kein Meßsystem in den Behälter einführen; ein empfindliches Meßgerät würde den chemisch aggressiven Dämpfen nicht lange standhalten. Es ist also tatsächlich nur eine Messung »von außen« möglich, und dafür bieten sich Strahlenschranken mit Kernstrahlungsquellen an.

Der Abteilungsleiter zögert noch einen Augenblick, denn die Strahlenquelle erfordert zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen. Doch dann signiert er den Konstruktionsentwurf ab, denn für diese Füllstandsmessung gibt es keine andere technische Lösung.

So etwa könnte eine Phase bei der Entscheidung für den Einsatz von Strahlenschranken verlaufen. Da aber bereits Tausende solcher Meßanlagen in der DDR im Einsatz sind, dürften die prinzipiellen Bedenken wegen des Strahlenschutzes gering sein – aber natürlich erfordert der Strahlenschutz zusätzlichen Aufwand.

Meßgut im Gammastrahl

Hier wollen wir jedoch dieses grundsätzlich gelöste Problem, das generell bei der Arbeit mit radioaktiven Substanzen besteht, nicht weiter erörtern und uns nun der physikalischen Wirkungsweise dieser Strahlenschranken zuwenden.

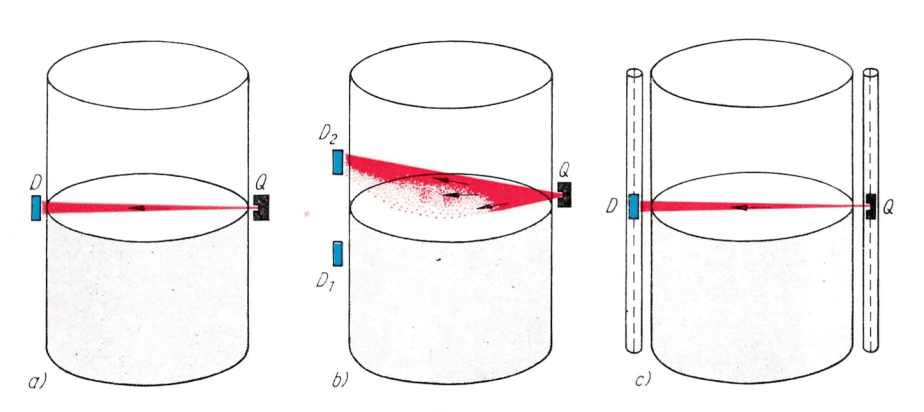
Gammastrahlen werden beim Durchdringen von Materialschichten geschwächt. Wenn man beispielsweise in den Strahlengang zwischen Kernstrahlungsquelle und Strahlendetektor eine Metallplatte hält, so vermindert sich die gemessene Strahlungsintensität. Beim Durchgang durch die Metallplatte wird ein Teil der Gammastrahlen in dem Metall absorbiert. Die Grundprozesse bei dieser Absorption, Fotoeffekt, Comptoneffekt und Paarbildung, sind bereits erläutert worden. Man kann die Wirkungsweise von Strahlenschranken aber auch ohne Kenntnis

dieser Grundprozesse verstehen – dafür genügt die Tatsache, daß die Intensität eines Bündels Gammastrahlen beim Durchgang durch Materialschichten mit wachsender Schichtdicke immer mehr verringert wird.
Entscheidend ist nun, daß energiereiche Gammastrahlen mit etwa 1 MeV Quantenenergie auch noch die Metallwände von Kesseln zu durchdringen vermögen. Gelangt zusätzlich Füllgut in den Strahlengang, so werden die Strahlen dadurch geschwächt, und der Detektor registriert eine entsprechend geringere Strahlungsintensität. Auf diese Weise läßt sich die Füllhöhe von Flüssigkeiten oder Schüttgütern in großen Behältern feststellen, ohne in die Behälter eindringen zu müssen. Das ist das Grundprinzip dieser Strahlenschranken; in diesem Sinne gelingt mit durchdringenden Gammastrahlen ein »Blick« durch die Behälterwand.
Es ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber anderen Methoden der Füllstandsmessung, daß die Baueinheiten der Strahlenschranken, Kernstrahlungsquelle und Meßsonde, außerhalb des Behälters angebracht werden. So ist die Messung völlig unabhängig von erschwerenden Bedingungen im Behälter, z. B. Überdruck, hohe Temperatur oder die Einwirkung chemisch aggressiver Substanzen.

Strahlenschranken

Das beschriebene Grundprinzip für Strahlenschranken wird in der Praxis durch verschiedene geometrische Anordnungen realisiert. Die am häufigsten eingesetzten Varianten sind in Bild 36 schematisch dargestellt.
Die einfachste Form einer Strahlenschranke zeigt Bild 36a. Auf der einen Seite der Behälterwand befindet sich die Strahlenquelle, und gegenüber ist an der Außenseite des Kessels die Meßsonde angebracht. Der Flüssigkeitsspiegel des Füllguts befindet sich gerade in der Höhe von Detektor und Strahlenquelle; bei weiterem Anstieg würde die Strahlungsintensität am Detektor verringert, beim Absinken des Flüssigkeitsspiegels registriert die Meßsonde eine erhöhte Strahlungsintensität.
Oft ist es jedoch nicht erforderlich, daß der Flüssigkeitsspiegel im Behälter genau auf einem konstanten Wert gehalten wird; es genügt, daß die Füllguthöhe innerhalb von zwei vorgegebenen Grenzwerten bleibt. Für diese Fälle ist die in Bild 36b dargestellte Anordnung vorgesehen. Jetzt sind an der Behälterwand gegenüber der Strahlenquelle zwei Meßsonden angebracht, deren Signale in einer elektronischen Zentrale ausgewertet werden. Die Funktionsweise läßt sich aus der schematischen Darstellung erschließen: Wenn der Füllstand unter die Höhe des Detektors D_1 absinkt, dann wird dieser Zustand signalisiert, indem sowohl D_2 als auch D_1 die ungeschwächte Strahlungsintensität messen. Steigt die Füllguthöhe über den Detektor D_2 an, so registrieren beide Meßsonden nur

36 Meßanordnungen zur Füllstandsüberwachung
Q Strahlenquelle; D Strahlendetektor



die durch das zu überwachende Produkt geschwächte Strahlungsintensität. In der Zentraleinheit der Strahlungsschranke werden die Signale von den Meßsonden so umgesetzt, daß eine automatische Korrektur des Füllstands durch Regelung von Zufluß und Abfluß erfolgen kann. Im ungestörten Betrieb müssen D_1 eine durch das Füllgut geschwächte und D_2 die ungeschwächte Strahlungsintensität registrieren.

Die beiden Grenzwerte für den Füllstand können dabei allerdings nur mit einer größeren Toleranz eingehalten werden, weil mit der Änderung der Füllhöhe die Substanz im Behälter erst allmählich den gesamten Strahlenweg zwischen Quelle und Sonde ausfüllt. Die Unschärfe der Anzeige steigt mit wachsender Neigung des Strahlenweges zwischen Quelle und Meßsonde gegenüber der horizontal verlaufenden oberen Begrenzung des Füllguts. Dennoch genügt die erreichbare Genauigkeit in vielen Fällen den Anforderungen der Praxis.

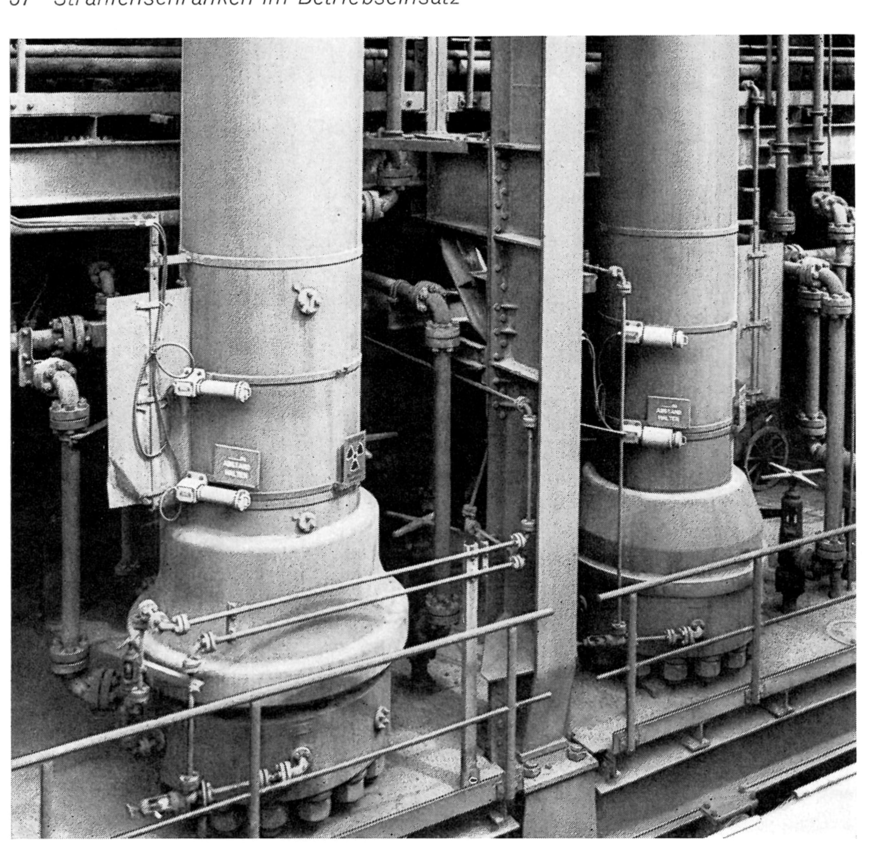
Nachlaufeinrichtung

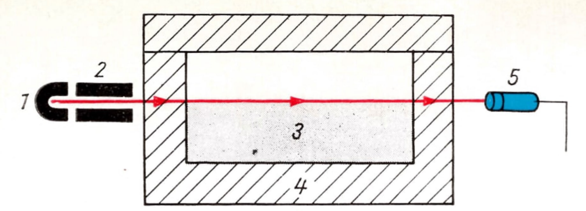
Wenn bei veränderlichem Füllstand eine präzisere Füllhöhenbestimmung gefordert wird, dann setzt man die in Bild 36 c dargestellte Nachlaufeinrichtung ein. Der Name weist bereits auf das Wesentliche dieser Meßanordnung hin: Bei diesem Meßsystem werden Strahlenquelle und Meßsonde an der Behälterwand in einem Schutzrohr durch einen mechanischen Antrieb der Füllhöhe nachgeführt. Durch die Bewegung von Quelle und Sonde kann die Füllhöhe »gesucht« werden; die Meßgeometrie entspricht dem in Bild 36a beschriebenen einfachsten Fall.

Strahlenquelle

Als Strahlenquellen werden im allgemeinen die Gammastrahler Kobalt 60 oder Zäsium 137 verwendet. Sie senden durchdringende Gammaquanten aus,

37 Strahlenschranken im Betriebseinsatz





38 Kontrolle und Regelung der Höhe des Glasspiegels
1 *Strahlenquelle;* 2 *Kollimator;* 3 *Glas;* 4 *Sinterstein;* 5 *Szintillationssonde*

wobei die energieärmere Strahlung des Cs 137 für geringere Materialdicken eingesetzt wird.

Detektor

Als Detektoren in den Meßsonden werden überwiegend Zählrohre benutzt. Nur wenn bei speziellen Meßaufgaben sehr empfindliche Meßsonden benötigt werden, finden Szintillationszähler Verwendung, die wesentlich empfindlicher als Zählrohre gegenüber Gammastrahlung sind.

Glasherstellung wird verbessert

Für die vielen Einsatzfälle von Strahlenschranken können nur stellvertretend einige Beispiele angeführt werden. Bild 37 zeigt die Füllstandsüberwachung mit zwei Meßsonden. Bei der Herstellung von Flachglas ist für die Qualität des Produkts die Einhaltung einer vorgegebenen Füllhöhe für die Glasschmelze, die sich in einer Wanne befindet, wesentlich. Bild 38 zeigt schematisch eine in der Praxis bewährte Meßanordnung, die diese Füllhöhe bis auf Schwankungen von wenigen Millimetern konstant zu halten gestattet. Die geforderte Meßgenauigkeit konnte mit dem Einsatz einer Szintillationssonde als Detektor erreicht werden.

Ernte mit Röntgenstrahlen

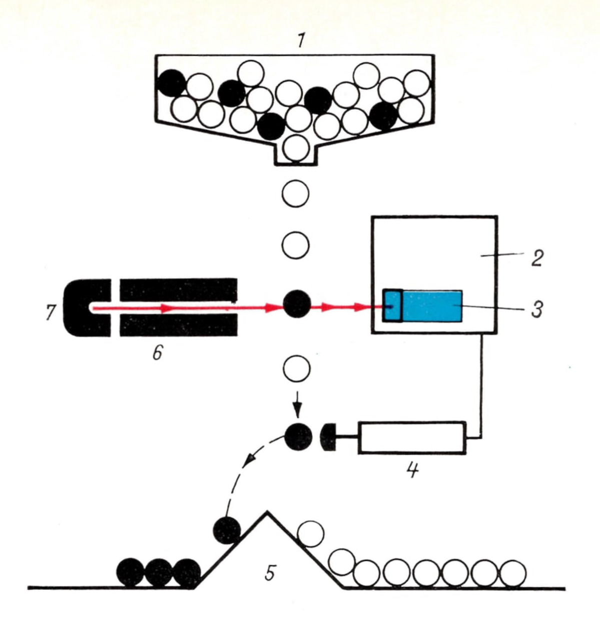
Ausgangspunkt war ein Problem in der Landwirtschaft – die Trennung der geernteten Kartoffeln von den Steinen und Erdklumpen, die von den Erntemaschinen ebenfalls mit aufgenommen worden sind.

Maschinen arbeiten schnell

Auf den ersten Blick erscheint das kaum als ein Problem, natürlich können die Steine und Erdklumpen auch »von Hand« ausgelesen werden. Aber es sind Arbeitskräfte einzusparen – ein Hauptziel der Mechanisierung der Landwirtschaft. Und komplette Maschinensysteme für den gesamten Erntevorgang erfordern, daß alle Arbeitsgänge einheitlich schnell erfolgen; auch das ist mit Handarbeit nicht immer möglich.

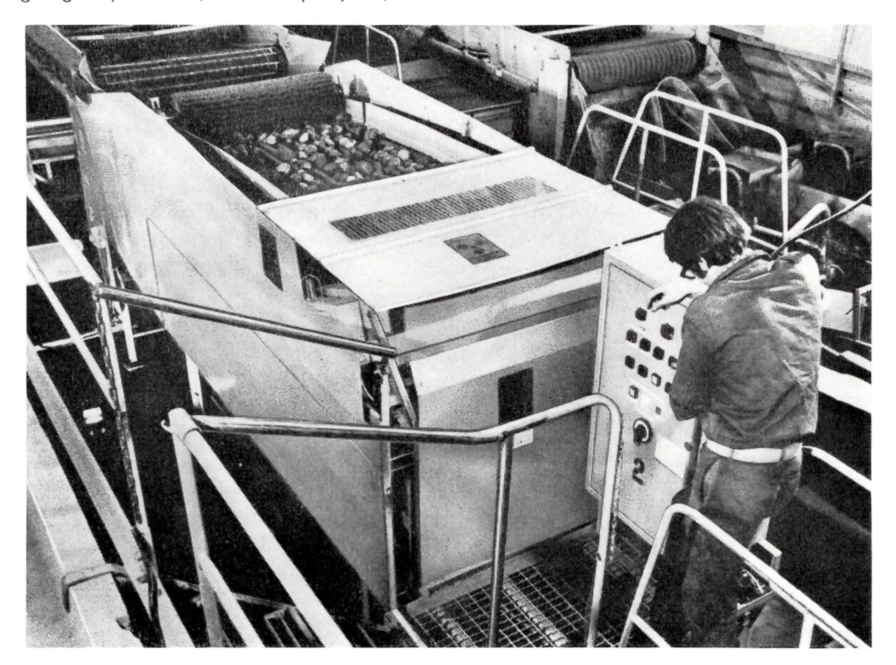
Röntgenstrahlen prüfen

So wurde das Auslesen des Erntegutes zu einem wesentlichen Kettenglied bei der durchgängigen Mechanisierung der Kartoffelernte, für das eine geeignete Lösung, eine automatische Sortiervorrichtung, gefunden werden mußte. Die Untersuchung mehrerer Varianten führte schließlich zu einem Meßprinzip, das für diesen Zweck zunächst ungewöhnlich erschien: Das Meßgut fällt durch einen Röntgenstrahl, und während es diesen passiert, wird auf Grund der Strahlenabsorption festgestellt, ob das betreffende Teil ein Stein oder Erdklumpen ist und aussortiert werden muß.
Das ist im Prinzip eine Strahlenschranke, die zur Erreichung sehr kurzer Reaktionszeiten speziell konstruiert worden ist. Inzwischen wird diese Anordnung produziert, und die Vorbehalte der Skeptiker wurden nicht bestätigt – die relativ komplizierten Geräte haben sich auch unter den stark belastenden Einsatzbedingungen in der Landwirtschaft bewährt. In Bild 39 ist die Wirkungsweise einer Röntgen-Strahlungsschranke, die auch als Produktanalysator bezeichnet wird, schematisch dargestellt.
Das Meßgut ist in einer mechanischen Vorrichtung auf etwa gleiche Größe vorsortiert worden und wird auf einem Förderband an die Meßstrecke herangeführt.



39 Wirkungsweise des Produktanalysators
1 *Meßgut;* 2 *elektronische Empfänger- und Stromversorgungseinheit;* 3 *Szintillationszähler;* 4 *Auswerfer;* 5 *Sortierung;* 6 *Kollimator;* 7 *Röntgenröhre*

40 Trennanlage mit Röntgen-Strahlungsschranke. Das von Kartoffelerntemaschinen eingebrachte Erntegemisch wird damit von unerwünschten Beimengungen (Steinen, Erdklumpen) befreit



In Bild 39 ist das Meßgut durch Kugeln gekennzeichnet, und zwar stellen schwarze Kugeln Steine oder Erdklumpen und weiße Kugeln Kartoffeln dar.

Strahlenquelle

Als Strahlenquelle wird eine Röntgenröhre, also keine Radionuklidquelle, benutzt. Das erleichtert wesentlich den Strahlenschutz, denn die Röntgenröhre strahlt nur während der Betriebszeit der Anlage, eine kurze Zeitspanne im ganzen Jahr. Und man müßte im anderen Fall Kernstrahlungsquellen recht hoher Aktivität einsetzen, um die erforderliche Strahlendosis zu erreichen. Die Röntgenröhre ermöglicht auch eine optimale Einstellung der Strahlungsenergie durch Regulieren der Hochspannung an der Röntgenröhre. Nach dem Austritt aus der Röntgenröhre durchläuft der Strahl einen Kollimator, der das für die spezielle Meßaufgabe erforderliche Nutzstrahlenbündel formt.

Steine stören

Durch dieses Strahlenbündel fallen nacheinander die Teile des Meßgutes, und während der kurzen Zeit, in der sie im freien Fall das Strahlenbündel durchschneiden, wird durch die Meßanordnung jedes dieser Teile auf Grund der unterschiedlichen Strahlenabsorption identifiziert. Steine und Erdklumpen absorbieren die Röntgenstrahlung wesentlich stärker als Kartoffeln, und so registriert der Szintillationszähler in der Meßsonde ein besonders kleines Signal, wenn – im Bild gesprochen – eine schwarze Kugel den Strahlengang passiert. Dann erhält der Auswerfer, ein pneumatisch angetriebener Metallbolzen, ein Signal, und die schwarze Kugel wird aus dem Meßgutstrom herausgestoßen. Die weißen Kugeln dagegen, die Kartoffeln, lösen den Auswerfer nicht aus, sie fallen auf ein Schaumgummipolster und sammeln sich auf dem Bild rechts, während die unerwünschten Beimengungen im Bild nach links aussortiert werden.

Extreme Sortiergeschwindigkeit

Wenn man eine solche Sortieranlage im praktischen Einsatz sieht (Bild 40), dann ist die hohe Geschwindigkeit des Sortiervorganges sehr beeindruckend. Auf dem Förderband wird das Erntegemisch vereinzelt aufgereiht an die Meßstelle herangeführt, und in jeder Sekunde können 25 Teile sortiert werden. Während das Auge bei maximaler Arbeitsgeschwindigkeit der Anlage die einzelnen Teile des Meßgutstromes kaum noch verfolgen kann, trennt die Meßanordnung noch mit einer Sicherheit von etwa 98%. Der zeitliche Abstand zwischen zwei Teilen, die nacheinander durch den Röntgenstrahl fallen, muß dabei mindestens 0,006 Sekunden betragen – eine Bedingung, die durch den Antransport des Erntegemischs über das Förderband erfüllt wird.

Die Röntgen-Strahlungsschranke 25112 wird in Verbindung mit der automatischen Trennanlage Typ E 691 des VEB Weimar-Kombinat als stationäre Anlage zum Sortieren des Erntegemischs eingesetzt und hat die hohen Anforderungen für den Einsatz in der Landwirtschaft erfüllt. Dabei sind 12 parallel arbeitende Kanäle je Anlage vorgesehen, wodurch eine weitere Leistungssteigerung erreicht wird – die Trennanlage verarbeitet je Stunde 30 t Erntegemisch.

Trennleistung der Sortieranlage

Der Einsatz der Röntgen-Strahlungsschranke ist natürlich nicht auf den hier beschriebenen Sortierprozeß bei der Kartoffelernte beschränkt. Die Strahlenschranke kann zum Sortieren beliebiger Teile im freien Fall oder auf Transporteinrichtungen eingesetzt werden. Sie ermöglicht die Kontrolle von Abfüllvorgängen bei hoher Arbeitsgeschwindigkeit, und man kann erwarten, daß weitere Anwendungen, die zu hohen Rationalisierungseffekten führen, gefunden werden. Im Vergleich mit den im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Strahlenschranken ist dabei wesentlich, daß die Röntgenstrahlungsschranke erheblich kürzere Reaktionszeiten erreicht und damit dieser Strahlungsmeßtechnik neue Anwendungsbeispiele erschließt.

Das Beispiel ist auch geeignet, den komplexen Zusammenhang des technischen Fortschritts in verschiedenen Bereichen zu veranschaulichen: Durch den Einsatz einer Röntgenröhre anstatt einer Kernstrahlungsquelle wurden unter Verwendung der kernphysikalischen Meßtechnik bei Strahlenschranken Leistungsdaten erreicht, die den sinnvollen Einsatz für eine bisher ungelöste Aufgabe in der Landwirtschaft ermöglichten.

Messung der Flächenmasse hilft Papier sparen

Das Wort »Flächenmasse« findet man wohl kaum im allgemeinen Sprachgebrauch. Wenn es hier dennoch als Überschrift gewählt wurde, so sollte damit ein durch die Technik geprägter und heute in Fachkreisen allgemein üblicher Begriff eingeführt werden, mit dem ein Komplex außerordentlich leistungsfähiger Geräte gekennzeichnet wird.

Was bedeutet »Flächenmasse«?

Die Flächenmasse ist die Masse je Flächeneinheit eines z. B. bandförmigen Materials und wird meist in der Dimension g/m² angegeben. Diese so definierte Flächenmasse kann mit Hilfe von Kernstrahlung gemessen werden. Bild 41 zeigt zwei verschiedene prinzipielle Anordnungen für die Messung der Flächenmasse, und zwar das Durchstrahlungsprinzip (a) und das Rückstreuprinzip (b). In Bild 42 ist eine in der DDR hergestellte Anlage zur Messung der Flächenmasse dargestellt.

Information durch Absorption

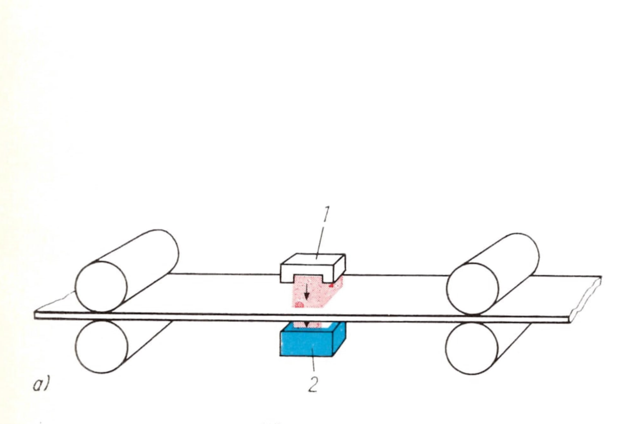
Wenden wir uns zunächst Bild 41 zu. Über dem Meßobjekt, z. B. einem durch die Rollen transportierten Papierband, befindet sich die Kernstrahlungsquelle, und unter dem Meßobjekt ist der Strahlendetektor angeordnet. Die von der Quelle emittierte Kernstrahlung trifft auf das Meßobjekt, und ein Teil dieser Strahlung wird im Papier absorbiert, während der durchdringende Rest den Strahlendetektor erreicht und damit registriert wird. Aus dieser Strahlungsintensität kann man auf die Flächenmasse der durchstrahlten Probe schließen – je größer die durchstrahlte Flächenmasse, desto geringer ist die gemessene Strahlungsintensität. Die Eichung der Meßanordnung erfolgt mit Proben bekannter Flächenmasse.

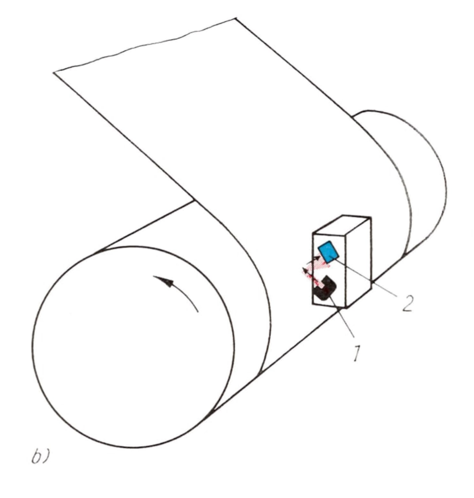
Durchstrahlungsanordnung

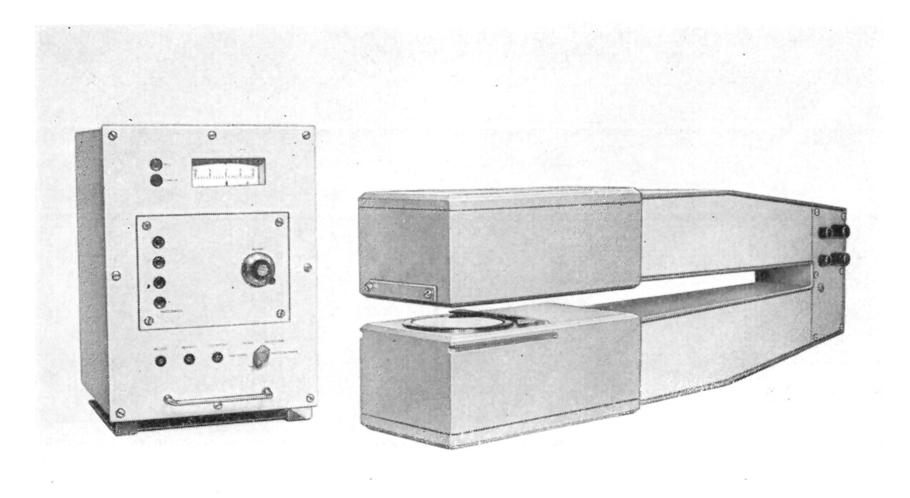
Rückstreuanordnung

Diese Anordnung wird in den weitaus meisten Fällen eingesetzt. Manchmal aber ist das Meßgut nur von einer Seite zugängig, dann benutzt man das Rückstreuprinzip entsprechend Bild 41b. Dabei sind Kernstrahlungsquelle und Detektor auf der gleichen Seite vom Meßgut angebracht; der Detektor muß demzufolge gegenüber direkter Einstrahlung von der Quelle abgeschirmt werden. Die Messung beruht auf folgendem physikalischen Vorgang: Die Kernstrahlung trifft auf das Meßgut und dringt in das Material ein – dabei wird jedoch im Material ein Teil dieser Strahlung zurückgestreut. Dieser rückgestreute Anteil wächst, wenn die »rückstreuende« Flächenmasse größer wird, und somit läßt sich durch Messen der rückgestreuten Strahlung die gesuchte Flächenmasse ermitteln (Bild 43). Allerdings gilt dieser Zusammenhang nur für geringe Schichtdicken,

41 Wirkungsweise von Flächenmassemeßgeräten
1 Strahlenquelle; 2 Meßsonde
a) Durchstrahlungsprinzip; b) Rückstreuprinzip







42 Flächenmassemeßanlage 24004

auf die das Meßprinzip damit beschränkt ist. Bei größeren Schichtdicken wird die rückgestreute Strahlung bereits im Meßgut selbst zu stark absorbiert.

Jetzt wollen wir uns wieder der häufiger eingesetzten Variante, die auf dem Durchstrahlungsprinzip beruht, zuwenden. Zunächst ist der Zusammenhang zwischen der Darstellung in Bild 41 und dem Gerät im Bild 42 herzustellen. Eine Flächenmassemeßanlage besteht aus einem Meßbügel zur Halterung des Meßkopfes und des Strahlers sowie der Zentrale, in der sich die elektronischen Baugruppen mit den Bedienungselementen und das Meßsystem zur Anzeige des Meßwertes befinden. Der obere Arm des Meßbügels enthält die Kernstrahlungsquelle, und im unteren Bügelarm befindet sich der Meßkopf, der als Strahlendetektor eine Ionisationskammer sowie die zugehörigen elektronischen Baugruppen beinhaltet. Zwischen den Armen des Meßbügels läuft das Meßgut als Band.

Detektor

Für den Einsatz in diesen Meßanlagen hat sich die Ionisationskammer sehr gut bewährt, sie wird fast ausschließlich verwendet, nur in Sonderfällen werden Szintillationszähler benutzt. In dem Abschnitt über Ionisationskammern ist in Bild 25 die spezielle Kammer abgebildet, die in der Flächenmassemeßanlage 24004 eingesetzt wird.

Um diese Meßanlagen vielseitig anwenden zu können, ist es notwendig, daß verschiedenartige Strahlenquellen verfügbar sind. Denn man benutzt die Anlagen z. B. zur Dickenmessung von Blechen in Walzwerken, zur Messung an Plastfolien und Papierbahnen und zur Bestimmung der Flächenmasse textiler Gewebe. Bei derart unterschiedlichem Meßgut ist das nur möglich, indem jeweils angepaßte Kernstrahlungsquellen verwendet werden.

Strahlenquellen

Zunächst kann man zwischen Beta- und Gammastrahlern wählen. Betateilchen sind für geringe Flächenmassen verwendbar, aber z. B. in dicken Metallbändern würden sie »steckenbleiben«, und man könnte hinter dem Band nichts messen. Deshalb werden für größere Flächenmassen die durchdringenden Gammastrahlen eingesetzt. Weiterhin nutzt man die physikalische Tatsache, daß bei Verwendung von Beta- und Gammastrahlen mit wachsender Strahlungsenergie stärkere Materialschichten durchstrahlt werden können. Nach diesen Kriterien

Keine Lücken im Meßbereich

ist für das Meßsystem 24004 eine Reihe Strahlenquellen entwickelt worden, mit denen ein großer Flächenmassebereich lückenlos erfaßt wird. Das zeigt folgende Übersicht:

Nuklid	Halbwertzeit in Jahren	Meßbereich für die Flächenmasse in g/m²
Pm 147	2,6	10··· 166
Kr 85	10,6	60··· 1050
Sr 90	28	240··· 5200
Am 241	458	800··· 28000
Kr 85/Bremsstrahlung	10,6	1770··· 54000
Cs 137	30	50000···150000
Co 60	5,6	80000···350000

Die ersten drei in der Übersicht angeführten Nuklide werden als Betastrahler eingesetzt, während die restlichen vier Nuklide in Quellen für Quantenstrahlung Anwendung finden. Ein Sonderfall ist dabei die Bremsstrahlungsquelle mit dem Betastrahler Krypton 85: Hier wird die Bremsstrahlung, die beim Abbremsen bzw. Ablenken von Betateilchen durch das elektrische Feld im Atombereich entsteht, als Nutzstrahlung verwendet.

Schließlich ist noch darauf hinzuweisen, daß die Aktivität der Radionuklide nach einer Exponentialfunktion, dem Zerfallsgesetz, mit der Zeit abklingt. Ein Maß für dieses Abklingen ist die Halbwertzeit – das ist die Zeitspanne, in der die Aktivität eines Radionuklids auf 50% des Ausgangswertes abgeklungen ist. Natürlich ist man bestrebt, in den Meßanlagen Nuklide mit großen Halbwertzeiten zu benutzen. Wenn jedoch relativ kurzlebige Nuklide mit wenigen Jahren Halbwertzeit eingesetzt werden müssen, dann wird in bestimmten Zeitabständen eine Korrektur der Anlage durchgeführt bzw. der Strahler ausgetauscht.

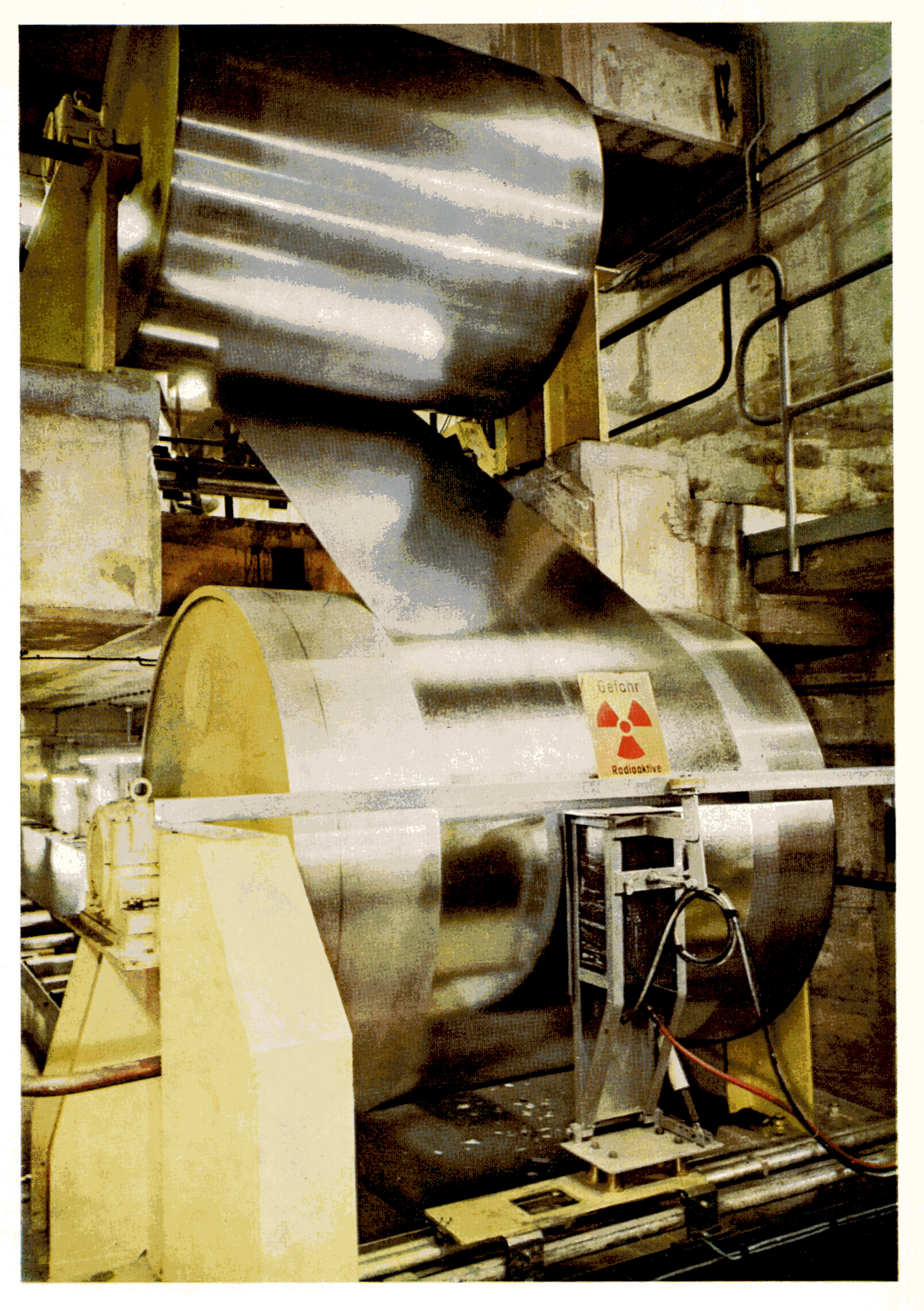
Qualitätssteigerung

Flächenmassemeßanlagen mit Kernstrahlungsquellen gehören heute zu den Standardausrüstungen der Meß- und Regeltechnik. Da sie das Produkt aus Materialdichte und Dicke messen, kann mit diesen Anlagen auch die Materialdichte bei konstanter Dicke oder die Materialdicke bei konstanter Dichte gemessen werden. Die Geräte tragen zur Qualitätssteigerung der kontrollierten Erzeugnisse bei, und Unregelmäßigkeiten im Produktionsprozeß sind kurzfristig erkennbar – eine Voraussetzung für die schnelle Beseitigung von Störungen. Besonders großer Nutzen wird durch die Einhaltung enger Fertigungstoleranzen mit Hilfe von Flächenmassemeßanlagen erreicht. Das läßt sich sehr anschaulich an Hand der Darstellung in Bild 44 erläutern.

Materialeinsparung

Bei der Papierherstellung darf die Schichtdicke einen Minimalwert nicht unterschreiten. Deshalb muß die mittlere Materialdicke bei ungeregelten Produktionsanlagen relativ hoch gewählt werden, damit auch für die dünnsten Stellen des Materials noch eine ausreichende Schichtdicke garantiert werden kann. Dieser Zustand ist auf dem linken Schreibstreifen in Bild 44 dargestellt. Wenn man nun die Schwankungen um den Mittelwert durch eine Meß- und Regeleinrichtung wesentlich verringert, so vermindert sich auch die Gefahr, daß die Minimaldicke unterschritten wird, und man kann die mittlere Materialdicke herabsetzen. Das zeigt der rechte Schreibstreifen in Bild 44. Im Mittelteil im Bild ist die Verschie-

43 Kontinuierliche Messung der Zinkschichtdicke nach dem Rückstreuverfahren. Für einen wirksamen Korrosionsschutz muß eine Mindestdicke bei der Bandverzinkung eingehalten werden


Gefahr
Radioaktive

58 60 62 64 66 g/m²

Material-
einsparung

Sollwert

Istwert

Kurve II

Kurve I

56 58 60 62 64 g/m²

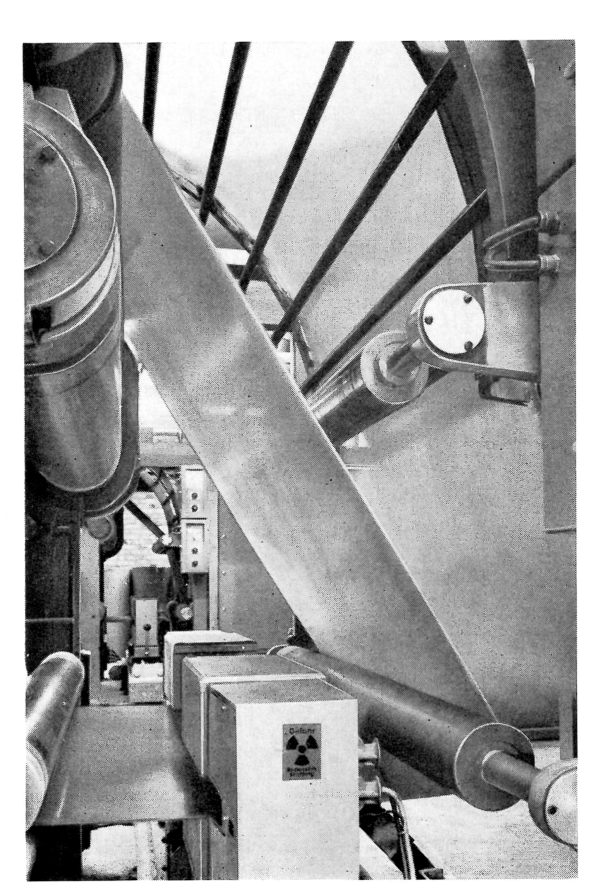
56 58 60 62 64 g/m³

Große Flächengewichts-schwankungen des „ungeregelten" Papieres

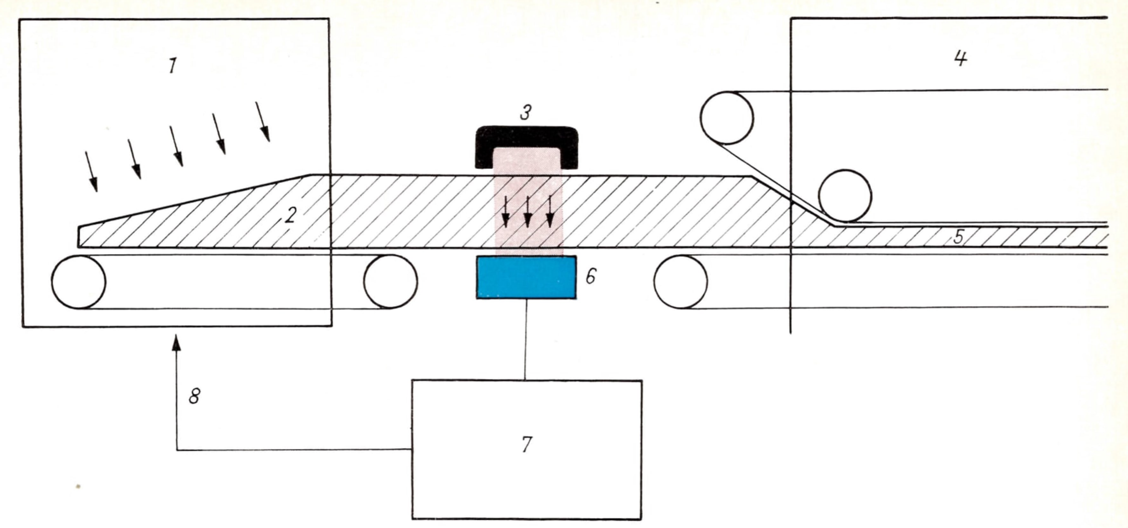
Häufigkeitskurve II zeigt gegenüber Kurve I neben Toleranzeinengung auch Verschiebung des Istwert-Mittelwertes auf den Sollwert (Materialeinsparung)

Genaue Einhaltung des Sollwertes durch Regelung

44 Materialeinsparung durch den Einsatz von Geräten zur Flächenmassemessung



45 Eine Durchstrahlungsanordnung zur Überwachung der Flächenmasse im Industrieeinsatz



46 Messung der Flächendichte bei der Herstellung von Spanplatten
1 *Streumaschine;* 2 *Spänekuchen;* 3 *Strahlenquelle;* 4 *Presse;* 5 *Spanplatte;* 6 *Ionisationskammer;* 7 *Meßzentrale;* 8 *Signal zur Regelung der Streumaschine*

bung der Verteilungskurven und der Mittelwerte dargestellt, und aus der Differenz zwischen den beiden Mittelwerten erhält man die Menge des eingesparten Materials, wenn man mit der insgesamt produzierten Papiermenge multipliziert. Aus dem Beispiel ist auch ersichtlich, daß Materialeinsparungen hauptsächlich deshalb entstehen, weil im kontinuierlichen Betrieb große Materialmengen die Meßanlage durchlaufen.

Bild 45 vermittelt einen Eindruck von den Einsatzbedingungen für Flächenmassemeßanlagen. Die Meßaufgaben und Umgebungsbedingungen sind sehr unterschiedlich, und im allgemeinen ist eine Anpassung der Anlage an das spezielle Meßproblem erforderlich. Aus der Vielzahl der realisierten Meßanordnungen kann hier nur ein Beispiel vorgestellt werden. Bild 46 zeigt schematisch den Einsatz einer Meßanlage für die Kontrolle der Flächenmasse bei der Spanplattenherstellung. Dabei beschränkt man sich nicht auf die Feststellung der Flächenmasse, sondern bei Abweichungen vom Sollwert wird das Meßergebnis zur Korrektur des Maschinensystems über einen Regelkreis benutzt.

Spanplattenherstellung

Der Bedarf an Meßanordnungen, die ohne Berührung des Meßobjekts kontinuierlich die Flächenmasse kontrollieren, entstand mit fortschreitender Automatisierung. Kerntechnische Hilfsmittel waren die Grundlage für eine inzwischen bestens bewährte Lösung. Diese Meßanlagen haben die Automatisierung von Produktionsprozessen beschleunigt, zur Steigerung der Produktionsgeschwindigkeit beigetragen und neue Produktionsverfahren ermöglicht. Und die vorgestellten Meßanlagen für die Flächenmasse amortisieren sich bei sachgerechtem Einsatz bereits nach kurzer Zeit.

Automatisierung

Kalium signalisiert seine Anwesenheit

Bei fast allen kernphysikalischen Analysenverfahren werden die zu analysierenden Elemente erst zur Strahlung angeregt.

In der Natur findet man aber einige Nuklide, die selbst strahlen; sie werden im Gegensatz zu den künstlich erzeugten Radionukliden »natürliche Radionuklide« genannt. Zu ihnen zählt auch das radioaktive Kaliumisotop K 40.

Ein Kaliumisotop strahlt

Dieses Kaliumisotop ist stets in den aus Lagerstätten gewonnenen Kalisalzen

enthalten. Man findet immer ein konstantes Mischungsverhältnis zwischen den stabilen Isotopen Kalium 39 und Kalium 41 sowie dem radioaktiven K 40. Der Anteil des Kalium 40 beträgt dabei 0,012%.

Beim Zerfall von K 40 wird sowohl Beta- als auch Gammastrahlung emittiert. Die Energie der Gammaquanten beträgt 1,46 MeV – es ist also durchdringende Strahlung, die nicht bereits wie Betastrahlung auf kurzen Wegstrecken im Material völlig absorbiert wird.

Kontrolle durch Strahlungsmessung

Wenn man nun diese Gammastrahlung mißt, kann man daraus auf die Anwesenheit und auch auf die vorhandene Menge von Kalium schließen – man nutzt also die Tatsache, daß natürliches Kalium spezifische Signale, Gammaquanten mit einer Energie von 1,46 MeV, ausstrahlt.

Dieses Meßverfahren wird erfolgreich zur Überwachung und Rationalisierung von Produktionsprozessen in der Kaliindustrie eingesetzt. Ununterbrochen werden in Kalibergwerken große Mengen an Kalisalzen gefördert und der Verarbeitung zugeführt, und eine schnelle und zuverlässige Messung der Kalikonzentration auf dem gesamten Verarbeitungsweg ist für die Prozeßsteuerung eine wesentliche Voraussetzung.

Keine Zeit für Probennahme

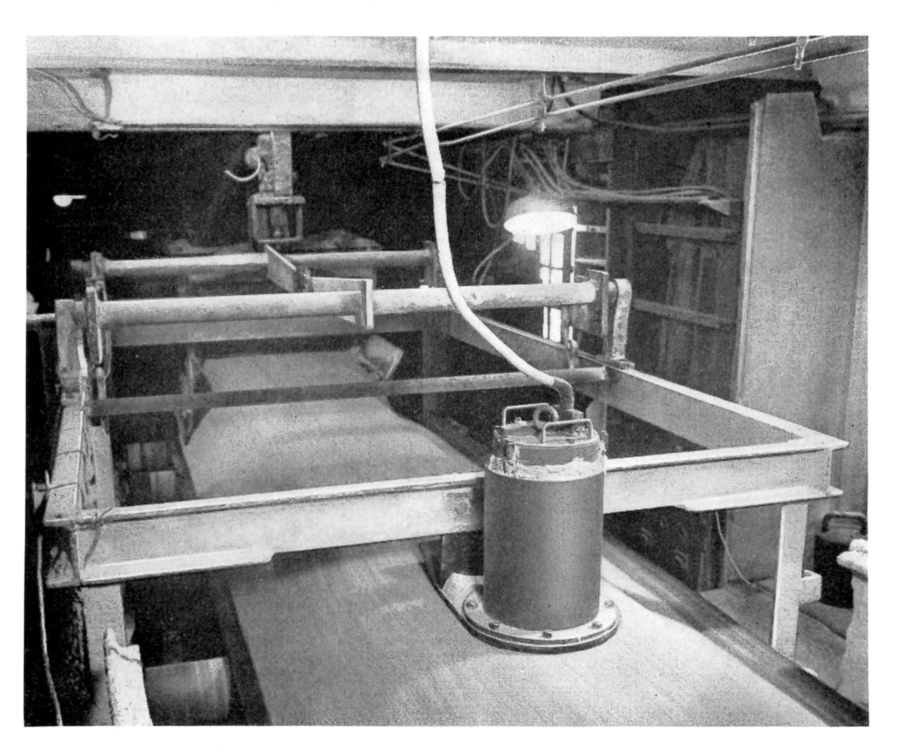
Probenanalysen im Chemielabor, womit nur kleine Probenmengen untersucht werden können und wobei oft zuviel Zeit zwischen Probenentnahme, Auswertung im Labor und Rückwirkung auf den Produktionsprozeß vergeht, können das Problem nur unzulänglich lösen. Dagegen hat hier die relativ einfache Methode der Strahlungsmessung zu einem wesentlichen Fortschritt geführt.

Ein solches Meßgerät im Industrieeinsatz ist in Bild 47 dargestellt. Es wird ein Meßkopf benutzt, der einen Szintillationszähler mit einem großvolumigen Szintillator enthält, um eine hohe Meßempfindlichkeit für die Gammastrahlen des

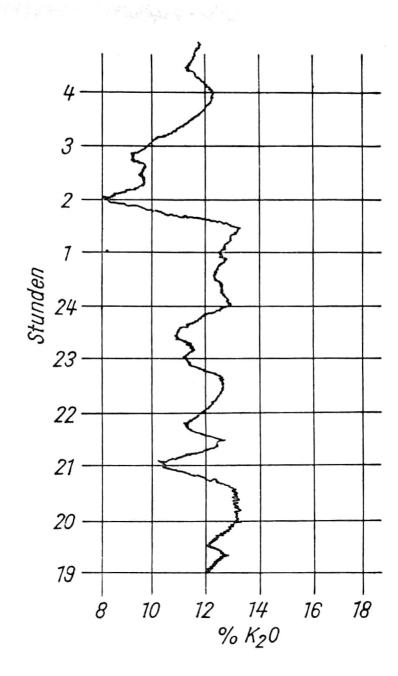
Ständige Überwachung

K 40 zu erhalten. Der Meßkopf ist über einem Transportband angebracht und überwacht kontinuierlich den Materialstrom auf diesem Band.

47 Bestimmung des Kaliumgehaltes von Rohsalz, das auf einem Transportband unter dem Meßkopf vorbeigeführt wird



48 Registrierstreifen aus einem Meßwertschreiber bei der kontinuierlichen Messung der Kaliumkonzentration



Vom Meßkopf gelangen die Impulssignale in die Meßzentrale, die sämtliche elektronischen Einheiten für die Betriebsspannung und Signalauswertung enthält. Die Zentrale selbst zeigt das Bild nicht, es ist nur das Kabel zu sehen, das vom Meßkopf zur Meßzentrale führt. An die Elektronikzentrale sind die Registriergeräte angeschlossen. Die vom Meßkopf aufgenommenen und in der Zentrale aufbereiteten Informationen werden z. B. mit einem Drucker als Zahlenwerte ausgedruckt oder auf dem Papierstreifen eines Schreibers zur Produktionskontrolle festgehalten. Eine solche mit einem Schreiber registrierte Meßkurve, die unmittelbar den K_2O-Gehalt des geförderten Meßgutes anzeigt, ist in Bild 48 dargestellt.

Daten für den Prozeßrechner

Schließlich ist noch wesentlich, daß der als »Kaligraf« bekannte Prozeßanalysator den Anschluß eines Prozeßrechners gestattet. Damit kann dieser Prozeßanalysator in die weitere Automatisierung der Produktion, die durch den zunehmenden Einsatz von Prozeßrechnern gekennzeichnet wird, eingeordnet werden.

Chemische Analyse mit Röntgenstrahlen

Chemie überall

»Chemie schafft Brot und Schönheit«, so wurde einmal ein Werbespruch formuliert, der die Bedeutung der chemischen Industrie anschaulich nahebringen sollte. Und wenn wir darüber nachdenken, so stellen wir bald fest, daß heute tatsächlich sehr viele Erzeugnisse mit Hilfe chemischer Verfahren hergestellt werden. Die Chemie als Wissenschaft von der Analyse und Synthese von Substanzen hat unsere gesamte materielle Umwelt wesentlich verändert. Die Auslagen in einer Drogerie sind unschwer als Erzeugnisse der chemischen Industrie zu erkennen, aber auch bei fast allen anderen Produkten, die in Kaufhäusern oder Spezialgeschäften angeboten werden, sind in irgendeiner Phase der Herstellung chemische Verfahren eingesetzt worden.

Bessere Analysen durch neue Geräte

Unter den Arbeitstechniken in der Chemie nimmt die chemische Analyse eine zentrale Stellung ein. Fortschritte in der Analysentechnik bedeuten Fortschritte für die gesamte Chemie. Und gerade hier hat sich in den letzten Jahrzehnten eine bemerkenswerte Wandlung vollzogen: Während früher hauptsächlich sogenannte Naßanalysen durchgeführt wurden, bei denen der Chemiker mit Flüssig-

keiten und Reagenzgläsern hantiert und beispielsweise durch Fällungsreaktionen zum Analysenergebnis gelangt, wird heute diese Arbeitsweise zunehmend durch physikalische Methoden und entsprechende Analysengeräte ersetzt.
Einige dieser neuen Analysengeräte beruhen auf kernphysikalischen Meßverfahren, und wir wollen uns nun einer solchen Anordnung zuwenden, die erst vor wenigen Jahren durch die Fortschritte der kernphysikalischen Meßtechnik entwickelt werden konnte und deren Bedeutung gegenwärtig rasch wächst.
Dieses Verfahren wird als Röntgenfluoreszenzmethode bezeichnet. Auf diesem Gebiet ist durch hochwertige Halbleiterdetektoren in den letzten Jahren in technischer Hinsicht ein Durchbruch erzielt worden. Um das Grundprinzip darzustellen, wollen wir auf das Bohrsche Atommodell zurückgreifen. Nach diesem Modell befinden sich die Elektronen im Atom auf bestimmten Bahnen, den sogenannten Elektronenschalen (vgl. S. 28).

Wie entsteht Röntgenfluoreszenzstrahlung?

Erinnern wir uns, daß durch schnell fliegende Teilchen, z. B. beschleunigte Elektronen, und auch durch Röntgen- und Gammastrahlen Elektronen aus der Atomhülle, den Elektronenschalen, herausgestoßen werden können. Zurück bleibt dann ein leerer Platz in der betreffenden Elektronenschale, z. B. der K- oder L-Schale. Dieser wird aber sofort wieder aufgefüllt, indem aus der Umgebung des Atoms ein freies Elektron in das Atom hineinstürzt, wobei ein Strahlungsquant emittiert wird.
Für das Grundprinzip des Analysenverfahrens ist nun entscheidend, daß die Energie dieses Strahlungsquants für das jeweils vorliegende Atom charakteristisch ist. Oder anders ausgedrückt: Für jedes chemische Element hat dieser Energiebetrag, der beim Auffüllen eines Loches z. B. in der K-Schale ausgestrahlt wird, einen ganz bestimmten Wert, den man aus Tabellen entnehmen kann. Die Energie dieser Strahlung liegt im Röntgenbereich, und da sie durch andere Strahlung erst angeregt wird, nennt man sie Röntgenfluoreszenzstrahlung.

Röntgenfluoreszenzanalyse

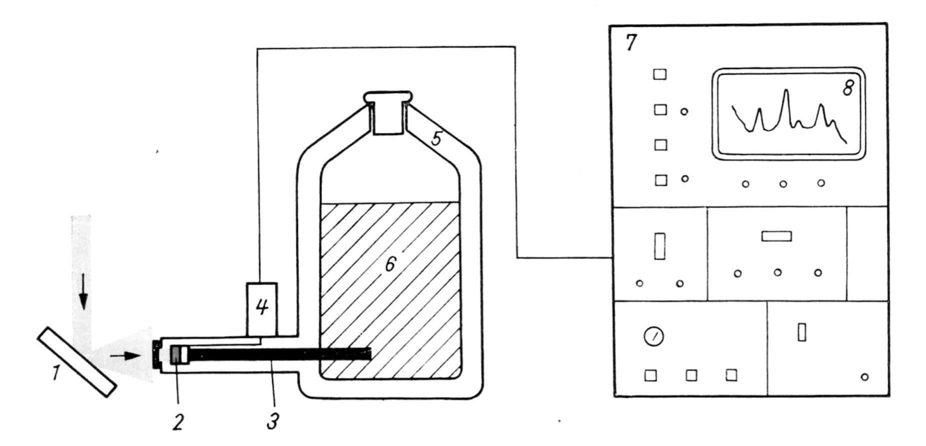
Das Analysenverfahren beruht auf folgender Idee: Man mißt die Energie der Röntgenfluoreszenzstrahlung und erhält aus diesen Energiewerten z. B. durch Vergleich mit Tabellen die chemischen Elemente, die in der Substanzprobe enthalten sind.

Voraussetzung: gute Energieauflösung

Das ist eine einfache Konzeption, aber sie setzt voraus, daß die Energie der emittierten Röntgenstrahlung hinreichend genau bestimmt werden kann. So betragen die Energiewerte für die K-Strahlung von Natrium, Magnesium und Aluminium in der Reihenfolge 1041 eV, 1254 eV und 1487 eV, und das bedeutet, daß der Meßfehler jedenfalls kleiner als 200 eV sein muß, wenn diese im Periodensystem benachbarten Elemente bei der Messung noch unterschieden werden sollen. Hier hat die Entwicklung von Halbleiterdetektoren in den letzten Jahren zu grundlegenden Fortschritten geführt. Heute werden Meßsysteme mit Siliziumdetektoren angeboten, für die bei einer Strahlung von 5,9 keV Quantenenergie 160 eV Energieauflösung garantiert wird, für ausgewählte Systeme werden noch bessere Werte angegeben. Bei 1 keV Strahlungsenergie ist bereits eine Energieauflösung von 100 eV erreicht worden, eine Voraussetzung, um das Analysenverfahren noch bis zur Messung von Kohlenstoff, also bis zur Ordnungszahl 6 im Periodensystem, ausweiten zu können.

Spektrometer mit Halbleiterdetektor

Wir wollen uns nun dem Aufbau einer solchen Meßanordnung zuwenden. Im Bild 49 ist ein System zur Röntgenfluoreszenzanalyse mit Halbleiterdetektor schematisch dargestellt. Durch diesen Detektor wird die gesamte Anordnung weitgehend festgelegt; ein System mit einem Szintillationszähler wäre wesentlich einfacher, aber es könnte im Periodensystem benachbarte chemische Elemente nicht mehr trennen. Die Strahlung, die zur Anregung der Probe *1* dient, ist rot eingezeichnet. Dazu wird oft ein Elektronenstrahlbündel, in manchen Meßsystemen auch Röntgen- oder Gammastrahlung benutzt. Die angeregte Probensubstanz emittiert Röntgenfluoreszenzstrahlung, im Bild 49 rot einge-



49 Meßanordnung zur Röntgenfluoreszenzanalyse (schematisch)
1 *bestrahlte Probensubstanz;* 2 *Halbleiterdetektor und erste Verstärkerstufe mit Feldeffekttransistor;* 3 *Kühlfinger;* 4 *Vorverstärker;* 5 *Dewargefäß;* 6 *flüssiger Stickstoff (–196 °C);* 7 *Vielkanalanalysator;* 8 *Bildschirm mit gemessenem Spektrum*

zeichnet, und ein Teil dieser Strahlung durchdringt das Strahleneintrittsfenster und gelangt auf den Siliziumdetektor *2*, der auf dem einen Ende des sogenannten Kühlfingers *3* angebracht ist. Dieser Kühlfinger ist ein Metallstab, dessen anderes Ende in das Innere des Dewargefäßes *5* hineinragt. Das Dewargefäß enthält flüssigen Stickstoff. Durch das Abkühlen des Kühlfingers wird die Temperatur des Detektors ebenfalls herabgesetzt. Damit ist eine hohe Energieauflösung erst möglich.

Rauscharm durch Kühlung

Sehr entscheidend für die Energieauflösung ist aber auch die Konstruktion des Vorverstärkers. In der Eingangsstufe des Vorverstärkers wird ein spezieller Transistor, ein Feldeffekttransistor, eingesetzt, der unmittelbar hinter dem Siliziumdetektor ebenfalls auf dem Kühlfinger montiert ist. Die Kühlung des Feldeffekttransistors ist notwendig, um die erforderliche rauscharme Verstärkung zu erreichen. Von der Eingangsstufe gelangen die Signalimpulse in die nachfolgende Verstärkerschaltung des Vorverstärkers, die außerhalb des gekühlten Bereiches angeordnet und in Bild 49 mit *4* bezeichnet ist. Der Vorverstärker besteht somit aus einem gekühlten und einem ungekühlten Teil. Die Hochspannung, die für den Betrieb des Siliziumdetektors notwendig ist, wird aus der Hochspannungsquelle entnommen. Vom Vorverstärker gelangen die Signalimpulse in den Hauptverstärker. Sie werden in dieser Funktionseinheit so weit verstärkt, daß sie anschließend von einem Vielkanalanalysator *7*, dessen Wirkungsweise bereits erläutert worden ist, weiterverarbeitet werden können.

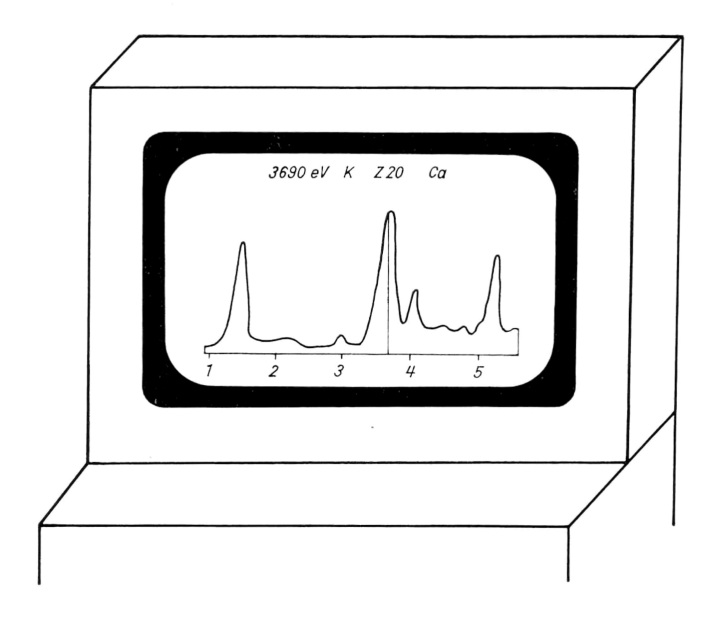
Energiespektrum auf dem Bildschirm

In dem Energieverteilungsspektrum, das so erhalten wird, findet man bestimmte Linien, die für die einzelnen chemischen Elemente charakteristisch sind – sie entsprechen der Strahlung, die bei der Besetzung eines Lochs in der K-Schale ausgestrahlt wird. So ermittelt man aus den K-Linien im Spektrum die gesuchten Elemente, und aus der Höhe dieser K-Linien kann man auf die Konzentration der entsprechenden Elemente schließen.

Für dieses hier etwas vereinfacht dargestellte Verfahren ist die K-Strahlung am besten geeignet, bei der Besetzung von Löchern in anderen Schalen entsteht energieärmere Strahlung. Die Emission von L-Strahlung wird bei der Analyse von Atomen mit hoher Ordnungszahl benutzt.

Strahlenquellen zur Probenanregung

Es sind verschiedenartige Analysensysteme im Einsatz, die sich u. a. durch die Anregung der Probe zur Strahlungsemission unterscheiden. Wenn die Probenanregung durch die Strahlung einer Röntgenröhre erfolgt, so lassen sich hohe



50 Darstellung eines Analysenergebnisses auf dem Bildschirm. Die Markierungslinie befindet sich auf der ausgeprägten K-Linie des Elements Kalzium (Ca, Ordnungszahl 20, Energie 3690 eV), das durch die Anwesenheit dieser K-Linie in der Probensubstanz nachgewiesen wurde

Strahlungsintensitäten und damit kurze Meßzeiten erreichen. Eine Röntgenröhre erfordert aber beträchtlichen Aufwand, so ist z. B. eine spezielle Hochspannungsquelle notwendig. Wesentlich vereinfacht wird die gesamte Meßanordnung durch den Einsatz einer Kernstrahlungsquelle. Für verschiedene Energiebereiche sind dann unterschiedliche Radionuklidquellen vorgesehen. Die Strahlungsintensität dieser Quellen ist allerdings geringer als bei einer Röntgenröhre.

Einsatz im Rasterelektronenmikroskop

Ein Beispiel für die Probenanregung durch einen Elektronenstrahl ist das Rasterelektronenmikroskop. Bei diesem Mikroskop wird ein Elektronenstrahl rasterartig über die Oberfläche der Meßprobe geführt, so daß er während des Meßvorgangs die gesamte Probenoberfläche abtastet. Dieses Rasterprinzip ist mit dem Strahlverlauf in einer Fernsehbildröhre vergleichbar. In der Fernsehröhre wird ja der Elektronenstrahl ebenfalls zeilenweise, also nach einem Raster, über die Bildfläche geführt. Die Bildfläche entspricht dann der Probenoberfläche, die im Mikroskop untersucht wird.

Probenoberfläche im Bild

Die Grundaufgabe des Rasterelektronenmikroskops ist das Abbilden einer Probenoberfläche – dafür werden die von dem gerade bestrahlten Probenbereich emittierten Sekundärelektronen benutzt. Wenn zusätzlich eine Elementanalyse durchgeführt wird, dann ist ein weiterer physikalischer Vorgang wesentlich: Von dem bestrahlten Probenbereich wird nämlich ebenfalls charakteristische Röntgenstrahlung ausgesandt.

Diese Strahlung, die – wie erläutert – durch Wiederbesetzung der Löcher in den Elektronenschalen entsteht, enthält Informationen über die Natur und Konzentration der chemischen Elemente, die sich in dem bestrahlten Probenbereich befinden. Bei der Analyse wird diese Information durch eine Strahlungsmessung mit einem Halbleiterdetektor, den man dicht an die angeregte Probenstelle heranführt, erfaßt.

Nachdem die Detektorsignale in den Elektronikeinheiten ausgewertet worden sind, erscheint auf dem Bildschirm des Analysengerätes die chemische Zu-

sammensetzung des momentan bestrahlten Probenbereichs. Wenn schließlich die Auftreffstelle des Elektronenstrahls durch Strahlablenkung rasterartig über die gesamte Probenoberfläche geführt wird, so erhält man als Analysenergebnis die Ortsverteilung chemischer Elemente auf der Probenoberfläche.

Ortsverteilung von Elementen

Auf diese Weise konnte durch den Anschluß von Meßsystemen, die ursprünglich für die Registrierung von Radionuklidstrahlung entwickelt worden sind, der Leistungsbereich dieser Elektronenmikroskope wesentlich erweitert werden.

Kontrollmessung senkt Silberverbrauch

Silber wurde in den letzten Jahren immer teurer, der Weltmarktpreis ist ständig gestiegen, und dennoch gelangen in der Industrie immer größere Silbermengen zum Einsatz.

Fotoschicht enthält Silber

Ein Großverbraucher für Silber ist die Fotoindustrie. Silber ist eine Grundsubstanz in den Emulsionen, die in Begießmaschinen auf die Filmunterlagen aufgetragen werden. Und der Verbrauch an Filmmaterial wächst von Jahr zu Jahr. Doch die Reserven an diesem Edelmetall sind begrenzt. Silber muß deshalb sparsam eingesetzt werden.

Besonders bei Röntgenfilmen, die eine hohe Empfindlichkeit aufweisen müssen, ist aber zur Absorption der durchdringenden Röntgenstrahlen eine relativ große Silberflächendichte erforderlich. Und da es unbedingt notwendig ist, zur Vermeidung von Fehlaufnahmen die angegebene Filmempfindlichkeit einzuhalten, hat man früher mit einer Silberüberdosierung von etwa 10 bis 20% gearbeitet.

Silberverluste

Durch diese Überdosierung entstehen jedoch beträchtliche Verluste, wie ein typisches Beispiel zeigt:

Silberflächendichte eines Röntgenfilmes	30 g/m²
10% Überdosis an Silber	3 g/m²
produzierte Filmmenge je Tag	10 000 m²
Silberverlust je Tag	30 000 g
Silberverlust je Jahr (300 Arbeitstage)	9 000 kg

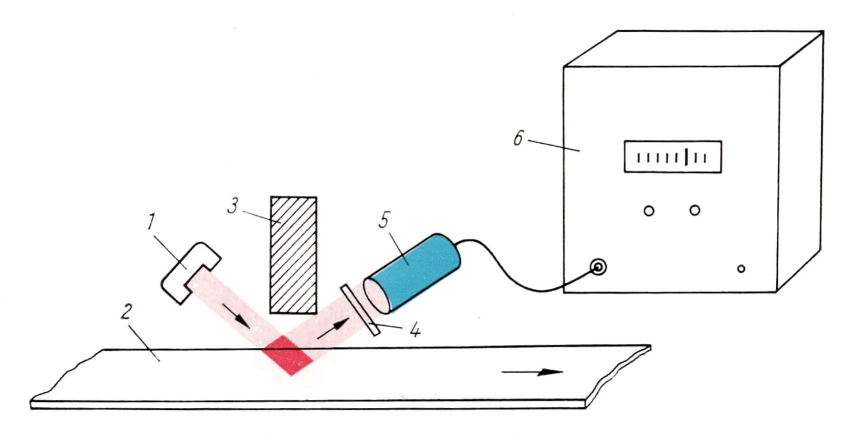
Es lohnt sich also, zur Verringerung dieser Verluste auch relativ aufwendige Meßgeräte einzusetzen.

Kontrolle des Silbergehalts

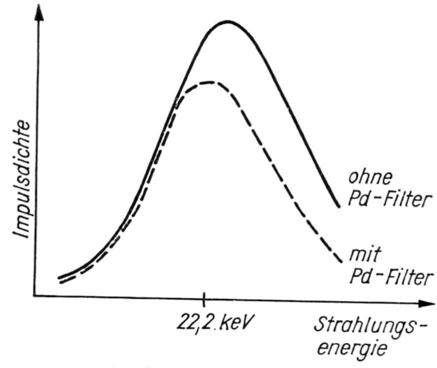
Dafür ist ein Analysenverfahren mit Radionuklidquellen entwickelt worden, das sich inzwischen außerordentlich bewährt hat. Bild 51 zeigt das Schema einer solchen Meßanordnung.

Dem Meßprinzip liegt die Anregung und Registrierung der Röntgenfluoreszenz-

51 Meßanordnung zur Kontrolle der Silberflächendichte bei der Filmherstellung
1 *Strahlenquelle;* 2 *Filmbahn;* 3 *Abschirmung;* 4 *Palladiumfilter;* 5 *Szintillationssonde;* 6 *Meßzentrale*



52 Unterdrückung störender Streustrahlung oberhalb 22,2 keV Strahlungsenergie durch ein Palladiumfilter



strahlung des Silbers zugrunde. Das physikalische Prinzip dieser Methode ist bereits ausführlich im vorangehenden Abschnitt dargestellt worden, hier sind aber noch spezielle technische Maßnahmen zu erörtern.

Strahlenquelle

Zunächst einige Bemerkungen zur Strahlenquelle. Für die Röntgenfluoreszenzanregung wird eine Amerizium-241-Strahlenquelle eingesetzt, deren Strahlung aber nicht unmittelbar auf die Meßprobe gelangt. Für die Meßempfindlichkeit ist es nämlich wesentlich, daß die Energie der anregenden Strahlung dem Energiebetrag der K-Linie des Silbers nahekommt. Deshalb läßt man die Strahlung der Ameriziumquelle zunächst auf ein Tellurtarget fallen und benutzt dann die vom Tellur wiederum emittierte K-Strahlung, deren Energie die angegebene Bedingung recht gut erfüllt, zur Bestrahlung der Filmbahn. Dadurch werden die in der Filmemulsion befindlichen Silberatome zur Aussendung von Röntgenfluoreszenzstrahlung angeregt, und die Intensität dieser Strahlung ist ein Maß für die Silberkonzentration in der Emulsion.

Meßsonde

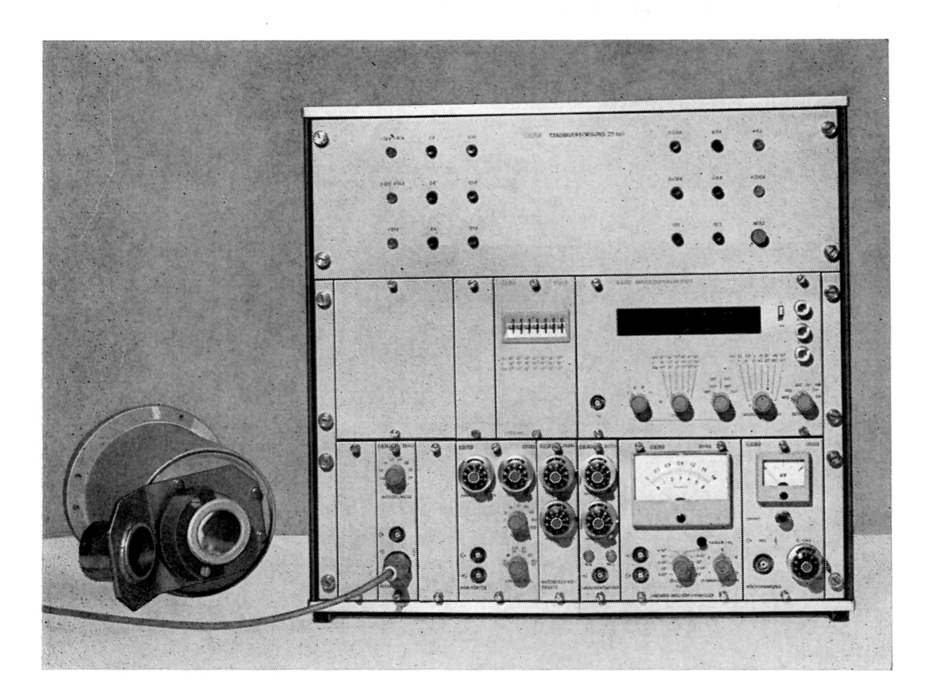
Als Strahlendetektor wird ein Szintillationszähler benutzt, der die Röntgenfluoreszenzstrahlung sehr empfindlich registriert. Dieser ist – wie Bild 51 zeigt – durch eine Abschirmung gegenüber der direkt von der Strahlenquelle einfallenden Strahlung geschützt. Vor dem Detektor ist ein aus Palladium hergestelltes Filter angeordnet. Dieses Palladiumfilter, schützt den Detektor teilweise vor störender Streustrahlung. In Bild 52 ist das Strahlungsspektrum dargestellt, das am Szintillationsdetektor gemessen wird. Um die Silberkonzentration zu bestimmen, muß die Röntgenfluoreszenzstrahlung des Silbers festgestellt werden, deren Energie 22,2 keV beträgt; andere Strahlungsanteile im Spektrum verfälschen den Meßwert. Bild 52 zeigt, in welchem Maße störende Streustrahlung durch Pd-Filter aus dem Strahlengang vor dem Detektor ausgeblendet wird.

Ein Meßgerät zum Bestimmen der Silberflächendichte zeigt Bild 53. Die Anordnung besteht aus dem Meßkopf und der Zentrale. Der Meßkopf wird – wie in Bild 51 schematisch dargestellt – über der Filmbahn befestigt. In dem massiven Gehäuse des Meßkopfes befindet sich der Szintillationszähler, der durch die Gehäusewand gegenüber Strahlung aus der Umgebung abgeschirmt wird. Vorn am Meßkopf sieht man das Strahleneintrittsfenster. Seitlich davon befindet sich in der am Meßkopf angeschraubten Halterung die Strahlenquelle. Aus dieser

Signal aus dem Filmmaterial

Quelle gelangt die Strahlung auf die Filmbahn. Dort regt sie die auf dem Film befindlichen Silberatome zur Emission von Röntgenfluoreszenzstrahlung an, und diese auf die Sonde zurückfallende Strahlung wird registriert.

Die Zentrale dieses Prozeßanalysators gleicht weitgehend dem für die Kaliummessung benutzten Gerät. Sie liefert die Hochspannung für den Szintillationszähler und empfängt die Impulssignale von der Sonde. Nach einer Verstärkung gelangen die Impulse zum Einkanalanalysator, dessen Kanal auf die Energie der Röntgenfluoreszenzstrahlung des Silbers, 22,2 keV, eingestellt ist. Störende Impulse, deren Amplituden anderen Energiewerten entsprechen, werden somit durch den Einkanalanalysator unterdrückt.



53 Meßgerät zur Bestimmung der Silberflächendichte bei der Filmherstellung

Elektronik zur Auswertung

Die Meßzentrale enthält einen Impulszähler, der das Meßergebnis als Zahlenwert abzulesen gestattet, und einen Impulsdichtemesser, an dem die Schwankungen der Silberflächendichte durch entsprechende Schwankungen des Zeigerausschlags erkennbar sind. Wie beim Kalium-Meßplatz kann auch hier das Meßergebnis durch Drucker oder Linienschreiber registriert werden. Es ist auch möglich, die Meßwerte entweder indirekt mit Hilfe eines Lochstreifenstanzers oder unmittelbar zur Weiterbearbeitung einem Rechner zuzuführen.
Die Geräte zur Messung der Silberkonzentration haben sich inzwischen im praktischen Einsatz in der Fotoindustrie vielfältig bewährt. Hier wurde nur eine Grundausführung dieser Gerätegruppe dargestellt, für spezielle Anwendungen sind weitere Gerätevarianten entwickelt worden.

Aktivierungsanalyse

Atomkerne werden »aktiviert«

Ein Atom besteht aus dem Atomkern und der Elektronenhülle. Bei der Röntgenfluoreszenzanalyse wird die Elektronenhülle zur Strahlung angeregt – jetzt wollen wir uns einem Analysenverfahren zuwenden, bei dem der Atomkern zur Strahlung veranlaßt wird. Der Atomkern wird dabei aktiviert, er wird radioaktiv, und diese Verfahren werden unter dem Begriff Aktivierungsanalyse zusammengefaßt.
Wie erfolgt nun diese Aktivierung des Atomkerns? Sie kann durch Neutronenbestrahlung oder auch durch Beschuß mit energiereichen Teilchen oder Gammaquanten erreicht werden. Weitaus am häufigsten verwendet man Neutronen, und wir wollen uns hier auf diese Variante beschränken.
Physikalisch geschieht dabei folgendes: Die Atomkerne in der bestrahlten Probensubstanz fangen Neutronen ein, wobei ein neu gebildeter Kern ein Neutron mehr als der ursprüngliche Kern enthält. Diese neuen Atomkerne sind häufig radioaktiv, und ihre Strahlung ist für jede spezielle Kernart ganz spezifisch.

Analyse durch Strahlungsmessung

Wenn wir diese Strahlung messen, können wir feststellen, welche Atomkerne

die Probe enthält. Auf diese Weise gelangt man zu einer qualitativen und quantitativen Bestimmung der chemischen Elemente in der Probensubstanz.
Praktisch wendet man folgendes Verfahren an: Die zu untersuchende Probe wird in eine Quarzampulle eingeschmolzen und gemeinsam mit Vergleichsproben bekannter Zusammensetzung in einer Bestrahlungskassette untergebracht.

Probenbestrahlung im Kernreaktor

Diese Kassette wird in den Bestrahlungskanal eines Kernreaktors eingeführt und dort mit Neutronen bestrahlt. Dabei bilden sich durch Neutroneneinfang radioaktive Atomkerne, wobei sich die einzelnen Kernarten in der ausgesandten Strahlung und der Lebensdauer unterscheiden.
Das Verfahren nach der Bestrahlung ist wesentlich von der Probensubstanz und dem Ziel der Analyse abhängig; hier soll nur ein häufig auftretender Fall beschrieben werden.
Wenn die bestrahlte Probe auch solche Radionuklide enthält, die nicht analysiert werden sollen und eine kurze Lebensdauer haben, so wartet man zunächst, bis diese störende Strahlung weitgehend abgeklungen ist. Dann werden die Gammaspektren sowohl der Analysenprobe als auch der Vergleichsprobe gemessen. Nun kann man beide Spektren miteinander vergleichen, und da man von der einen Probe die Zusammensetzung kennt, ist deren Spektrum eine Art Maßstab,

Information aus Gammaspektren

mit dem man das Spektrum der unbekannten Probe analysieren kann. Durch Vergleich der Gammalinien ermittelt man die zugehörigen Atomkerne bzw. chemischen Elemente, und aus den Intensitäten dieser Linien ergeben sich die Konzentrationswerte für die betreffenden Elemente.
Oft müssen aber auch gerade kurzlebige Radionuklide gemessen werden. Dann sind kurze Transportzeiten wesentlich, und die bestrahlte Probe wird mit einer Rohrpostanlage vom Bestrahlungsort zum Gammaspektrometer befördert.
In den Meßsonden werden häufig hochauflösende Halbleiterdetektoren eingesetzt. Wenn dennoch störende Linien verbleiben, so erfolgt vor der Messung eine chemische Trennung, um die Radionuklide mit den störenden Linien zu entfernen.
Die Aktivierungsanalyse mit Neutronen wurde in den letzten zwanzig Jahren von einer nur in Sonderfällen angewandten Methode zu einem Analysenverfahren entwickelt, das heute viele Betriebe und Institute zur Lösung von Forschungs- und Kontrollaufgaben nutzen. In der DDR wird ein Kernreaktor des Zentralinstituts für Kernforschung in Rossendorf zur Probenbestrahlung eingesetzt, und eine Arbeitsgruppe in diesem Institut hat wesentliche Beiträge für die Verbreitung dieser Analysenmethode geleistet. Aus der Vielzahl der Anwendungen können nur einige Beispiele angeführt werden.

Gesteinsproben werden analysiert

Gesteinsproben sind schwer zu bearbeiten. Chemische Analysen sind aufwendig, zumal äußerst geringe Spuren von Elementen nachgewiesen werden müssen. So beträgt der Goldgehalt in Gesteinen normalerweise nur etwa 0,004 Gramm je Tonne, und diese winzige Goldmenge muß gemessen werden, da der Geochemiker aus Schwankungen des Goldgehalts wichtige Schlußfolgerungen ziehen kann. Wenn der Goldgehalt über den Durchschnittswert ansteigt, so sind weitere Bodenerkundungen sinnvoll, während man im anderen Fall auf kostspielige Tiefenbohrungen verzichten kann.
Zum Untersuchen von Gesteinsproben ist die Aktivierungsanalyse aus zwei Gründen gut geeignet: Einmal ist keine spezielle Aufbereitung des Gesteins erforderlich, und zum anderen werden die geforderten extrem hohen Empfindlichkeiten erreicht. So wird, um ein weiteres Beispiel zu nennen, häufig der Aluminiumgehalt in Granit durch eine Aktivierungsanalyse bestimmt, wobei die Strahlung des Nuklids Aluminium 28, dessen Halbwertzeit 2,3 Minuten beträgt, gemessen wird. Man bestrahlt dabei 10 Sekunden, gemessen wird etwa 5 Sekunden, und für den Probentransport ist eine Rohrpostanlage erforderlich.
Manche Untersuchungen werden zwar sehr selten durchgeführt, haben aber eine

Mondgestein unter Neutronenbeschuß

außerordentlich große wissenschaftliche Bedeutung. Das bekannteste Beispiel dafür ist wohl die Analyse von Gesteinsproben, die mit sowjetischen und ameri-

kanischen Raumfahrzeugen von der Mondoberfläche zur Erde transportiert worden sind. Für die Erforschung dieses Mondgesteins war die Aktivierungsanalyse ein außerordentlich wertvolles Hilfsmittel.
Mit Aktivierungsanalysen sind sehr hohe Empfindlichkeiten erreichbar. Zahlenwerte dafür sind abhängig von den Meßbedingungen, der Probensubstanz und den nachzuweisenden Elementen. Zur Orientierung kann eine Nachweisempfindlichkeit von 10^{10} Atomen/cm^3 genannt werden, die in vielen Fällen erreicht und für einige Elemente wesentlich überschritten wird.

Extreme Empfindlichkeit

Derart geringe Konzentrationen müssen bei Ausgangsmaterialien für Halbleiterbauelemente gemessen werden. Halbleiterbauelemente, Transistoren und Mikroschaltkreise, sind heute Grundlage für außerordentliche Fortschritte in der modernen Elektronik. Diese Fortschritte erfordern die Beherrschung einer Vielzahl technologischer Prozesse, und die Entwicklungskette beginnt bei dem Ausgangsmaterial, Silizium und Germanium. Die wesentlichen elektrischen Eigenschaften dieser Grundmaterialien werden durch äußerst geringe Verunreinigungen, z. B. durch Schwermetallatome in einer Konzentration von etwa 10^{12} Atome/cm^3, verändert. Mit der Aktivierungsanalyse gelingt der Nachweis dieser Fremdstoffkonzentrationen, und damit kann man das Material in den einzelnen Verarbeitungsstufen kontrollieren und aufgetretene Fehler in der Verarbeitungstechnologie beseitigen.

Halbleiter unter Kontrolle

Für manche Proben, die bestimmte chemische Elemente enthalten, wird die Aktivierung mit einem Strahl hochenergetischer Teilchen durchgeführt, die in Beschleunigern auf die dafür notwendige Geschwindigkeit beschleunigt worden sind. In Neutronengeneratoren erzeugt man mit Hilfe beschleunigter Teilchen Neutronen, die für die Aktivierung bei speziellen Analysen eingesetzt werden. Mit Neutronengeneratoren kann man relativ kompakte Meßanlagen aufbauen, die auch für Industrielaboratorien geeignet sind. Ein Beispiel dafür ist ein in der Sowjetunion entwickeltes Meßsystem mit der Bezeichnung K-1. Es besteht aus dem Neutronengenerator, der Rohrpost, einem Spektrometer mit Szintillationszähler zur Aktivitätsbestimmung, Recheneinheiten zur Auswertung der Meßergebnisse und der Steuereinheit, die einen automatischen Betrieb der Anlage ermöglicht.

Weniger Aufwand durch Neutronengeneratoren

Hauptsächlich werden diese Meßanlagen zur Kontrolle der Sauerstoffkonzentration in Stahl eingesetzt. Bei der Stahlerzeugung im Konverterverfahren ist die Schmelzdauer relativ gering, und zwar unter einer Stunde, und die Schnellbestimmung der Sauerstoffkonzentration im Konverterstahl gestattet ein Optimieren des Schmelzprozesses, wenn die Analysendauer genügend kurz ist. Das gelingt mit der Anlage K-1. Für den angegebenen Fall wird eine Analysendauer von etwa einer Minute je Stahlprobe erreicht.

Sauerstoffgehalt im Stahl

Winzige Materialspuren werden entdeckt

Durch Messen der Strahlung, die bei einem Kernzerfall emittiert wird, lassen sich außerordentlich geringe Substanzmengen nachweisen. Jeder Spannungsimpuls, den die Kernstrahlung in einem Detektor auslöst, entspricht unmittelbar dem Zerfall eines einzigen Atomkerns.
Schon zu Beginn der Entwicklung der Kernstrahlungsmeßtechnik wurde ihre sehr hohe Meßempfindlichkeit erkannt. Erstmalig haben 1913 die Radiochemiker *G. Hevesy* und *F. Paneth* die Methode der »markierten Atome« angewendet und damit die Sättigungskonzentration von schwerlöslichen Bleisalzen in Wasser bestimmt. Diese bahnbrechenden Arbeiten, mit denen ein neues, außerordentlich leistungsfähiges Meßverfahren eingeführt wurde, sind mit dem Nobelpreis gewürdigt worden.

Extrem empfindlich mit »markierten Atomen«

Als Sammelbegriff für diese Verfahren haben sich mehrere Bezeichnungen eingebürgert. Man spricht von markierten Atomen, weil bestimmte Atomkerne

durch das Aussenden von Strahlung beim Zerfall gewissermaßen markiert sind, sich also von den stabilen Atomkernen unterscheiden. Ebenso wird die Bezeichnung Indikatormethode gebraucht, da dieser Methode die Anzeige (lat.: indicare – anzeigen) der zu verfolgenden Substanz zugrunde liegt. Der Begriff Tracertechnik (engl.: tracer – Spurensucher) kennzeichnet, daß bei diesen Verfahren die Spur von Substanzen, die sich bei chemischen oder physikalischen Vorgängen über kleine oder auch große Entfernungen bewegen, gesucht wird.

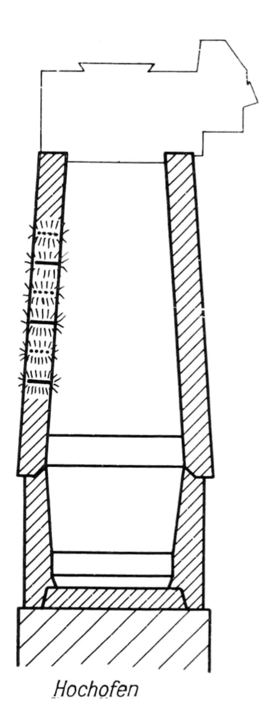
Durch die Verfügbarkeit von künstlich erzeugten Radionukliden – in der Anfangsphase konnten nur die natürlichen Radionuklide eingesetzt werden – wurde parallel zur Entwicklung der Kerntechnik auch der Anwendungsbereich der Indikatormethode entscheidend erweitert, und inzwischen ist in fast allen Wissenschafts- und Industriezweigen eine Vielzahl von Meßaufgaben mit diesem Verfahren erfolgreich bearbeitet worden. Speziell auf dem Gebiet der Molekularbiologie, die heute im Brennpunkt des wissenschaftlichen Interesses steht, sind grundlegende Fortschritte durch den Einsatz von Radionukliden als Tracer erzielt worden. In der Industrie kontrolliert und optimiert man technologische Prozesse mit Hilfe radioaktiver Indikatoren, deren Weg während des Prozeßablaufs mit relativ einfachen Strahlungsmessungen verfolgt werden kann. Die Bewegung von Sandmassen an Meeresküsten, die Strömung von unterirdischen Wasseradern – das sind typische Meßaufgaben, die durch Markierung mit Radionukliden erfolgreich bearbeitet worden sind.

Erfolge durch Tracer

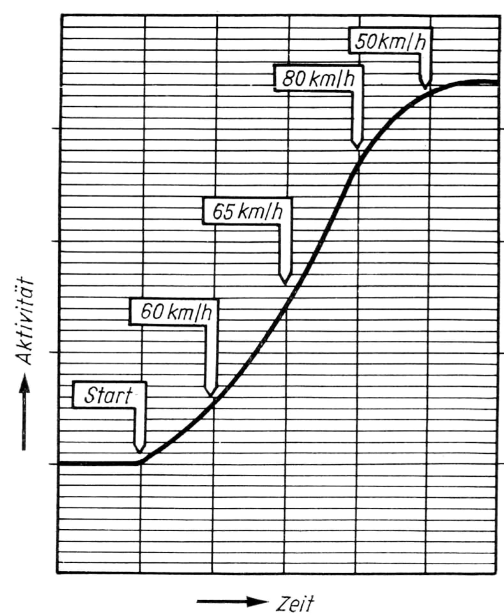
Da die Tracertechnik für sehr unterschiedliche Meßprobleme eingesetzt wird, muß im Einzelfall die Methode angepaßt und der Arbeitsablauf speziell festgelegt werden. Das ist aus den folgenden beiden Anwendungsbeispielen ersichtlich.

Hochofenkontrolle

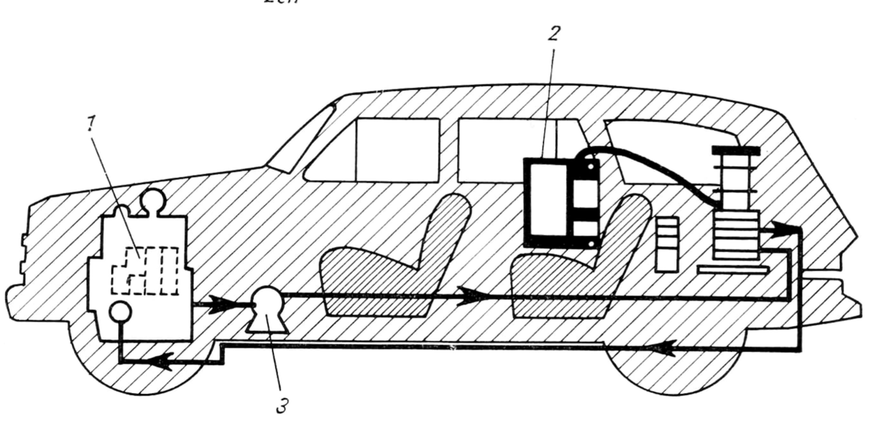
Beim Betrieb von Hochöfen ist die Kontrolle der feuerfesten Auskleidung der Ofenwände ein besonderes Problem. Diese feuerfeste Auskleidung nutzt sich beim Betrieb des Hochofens ab, und ihre Schichtdicke verringert sich. Durch die Ofenauskleidung wird die metallische Ofenwand vor dem Inhalt des Ofens, also heißem Metall oder Schlacke, geschützt. Wenn nämlich der Ofeninhalt mit



54 Kontrolle der Ofenauskleidung von Hochöfen mit Radionukliden



55 *Verschleißmessung an einem Fahrzeugmotor*
1 radioaktive Kolbenringe; 2 Zählgerät; 3 Pumpe
links: Aktivitätsanstieg im Filter



der Ofenwand in Berührung kommt, so entstehen große Schäden durch Zerstörung der Ofenwand. Das ist vermeidbar, wenn man während des Betriebes des Hochofens ständig die Abnützung der Ofenauskleidung verfolgen kann.
Früher wurden die Hochöfen in bestimmten Zeitabständen stillgelegt, um die Ofenauskleidung zu kontrollieren. Heute läßt sich diese Überwachung mit Hilfe von Radionukliden wesentlich einfacher und ökonomischer durchführen.

Ofenwand radioaktiv

So kann man in die Ofenauskleidung in verschiedenem Abstand vom Inneren des Ofens und besonders an den gefährdeten Stellen gekapselte radioaktive Präparate einbauen, wie es in Bild 54 schematisch dargestellt ist. Wenn infolge Korrosion eine Kapsel vom Ofeninhalt erfaßt und von ihrem Platz entfernt wird, dann verringert sich die an der Außenseite der Ofenwand meßbare Strahlungsintensität. Mit einer Meßanordnung kann man also während des Betriebes des Hochofens relativ einfach feststellen, wann die Ofenauskleidung eine durch die bekannte Lage des Präparates gegebene Schichtdicke erreicht hat. Auf entsprechende Weise ist eine kontinuierliche Überwachung der feuerfesten Auskleidung möglich, wenn an Stelle einzelner Präparatekapseln ein enger Kanal mit einer radioaktiven Substanz gefüllt wird. Die kontinuierliche Abnahme der an der Außenwand gemessenen Strahlungsintensität läßt unmittelbar auf die Verringerung der Wandstärke schließen.

Als Radionuklide können natürlich nur Gammastrahler verwendet werden, da Alpha- und Betateilchen die dicken Ofenwände nicht zu durchdringen vermögen. Meist wird dafür Kobalt 60 eingesetzt.
Allerdings dürfen die benutzten Aktivitäten nicht so groß sein, daß eine unzulässig starke Verseuchung des geschmolzenen Metalls verursacht wird. Durch Messen der Radioaktivität des ausfließenden Ofeninhalts läßt sich ebenfalls feststellen, wann irgendeines der in die Ofenauskleidung eingebauten Präparate von dem heißen Ofeninhalt herausgespült wird.

Verschleißtest an Maschinenteilen

Ein anderes Beispiel betrifft die Verschleißmessung an Kolbenringen in Fahrzeugmotoren.
Überall dort, wo zwei Flächen fester Körper aufeinanderreiben, nutzen sich die Oberflächen ab, und winzige Materialteilchen werden von den Berührungsstellen losgerissen. Bei Verschleißmessungen nach der Indikatormethode markiert man die reibenden Materialflächen mit Radionukliden, und nun lassen sich die abgerissenen kleinen Teilchen aufgrund ihrer Radioaktivität durch eine Strahlungsmessung verfolgen.
Eine solche Meßanordnung zum Verschleißtest an Fahrzeugmotoren ist schematisch in Bild 55 dargestellt. Die Oberflächen der Kolbenringe sind mit einem Radionuklid markiert worden. Während der Fahrt werden diese Oberflächen durch die Bewegung der Kolbenringe im Zylinder beansprucht, und die dabei losgerissenen winzigen Metallteilchen gelangen mit dem Motorenöl, das durch die eingezeichnete Pumpe in Pfeilrichtung transportiert wird, in das Filter im hinteren Wagenteil. In diesem Filter sammeln sich die radioaktiven Partikel, und das dadurch bedingte Anwachsen der Aktivität wird mit einem Strahlungsmeßgerät registriert. Eine so gemessene Registrierkurve ist in Bild 55 ebenfalls dargestellt, und sie zeigt deutlich, daß der Aktivitätsanstieg und damit der Verschleiß mit wachsender Geschwindigkeit zunimmt und bei 80 km/h am größten ist, während er anschließend bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h ganz wesentlich zurückgeht.

Bessere Motorbauteile

Mit dieser Meßanordnung hat man die Möglichkeit, bei der Konstruktion von Motoren Details zu optimieren und die verschleißmindernde Wirkung unterschiedlicher Schmieröle zu kontrollieren.
Ähnliche Anordnungen zur Verschleißmessung finden im gesamten Maschinenbau Anwendung und bringen der Volkswirtschaft großen Nutzen.

Hilfsmittel in der Medizin



Neue Technik führt zu Fortschritten

Wenn mit Kernenergie Strom erzeugt wird, wenn Geräte mit Kernstrahlungsquellen Walzstraßen steuern, dann hat das Bedeutung für die Volkswirtschaft und damit auch für uns alle, aber wir kommen persönlich im allgemeinen nicht unmittelbar damit in Berührung. Der Einsatz von Radionukliden in der Medizin betrifft uns dagegen unmittelbar, wenn der Arzt nach einer Untersuchung feststellt: »Sie müssen zu einem nuklearmedizinischen Test.« Und solche Spezialuntersuchungen mit Radionukliden werden in jedem Jahr in der DDR an vielen Tausend Patienten durchgeführt.
Die rasch wachsende Bedeutung dieser relativ neuen Verfahren zeigt sich in der ständigen Zunahme an nuklearmedizinischen Leistungen, international wird der jährliche Zuwachs auf etwa 20% geschätzt. Dementsprechend werden auch weltweit die Kapazitäten für nuklearmedizinische Untersuchungen vergrößert, und der überwiegende Anteil der in Kernreaktoren oder mit Beschleunigern hergestellten Radionuklide findet in der Nuklearmedizin Verwendung.
Welche neuen Möglichkeiten eröffnen sich nun durch den Einsatz von Radionukliden in der Medizin? Das soll zunächst an einem allgemeinen Beispiel erläutert werden.
Für den Arzt ist es oft wichtig, den Weg bestimmter Substanzen, die z. B. mit der Nahrung aufgenommen werden, im menschlichen Körper verfolgen zu können. Dann lassen sich Abweichungen vom Normalfall, vom Ablauf der Vorgänge im gesunden Körper, feststellen, und der Arzt erhält wertvolle Informationen für die Diagnose, eine Voraussetzung für die Einleitung einer Heilbehandlung.

Diagnose mit markierten Atomen

Diese Wanderung von chemischen Substanzen im menschlichen Körper, der sogenannte Stoffwechsel, läßt sich verfolgen, wenn der Patient z. B. eine Flüssigkeit trinkt, die mit Radionukliden markierte Moleküle enthält. Dabei ist entscheidend, daß Atome mit radioaktiven Atomkernen am gesamten Stoffwechsel ganz genau so teilnehmen wie Atome des gleichen chemischen Elements, die stabile Kerne enthalten. Beim Zerfall der Radionuklide, die mit chemischen Methoden in die zu verfolgenden Moleküle eingebaut worden sind, entsteht Kernstrahlung, und diese Strahlung kann außerhalb des Körpers mit Strahlungsmeßgeräten nachgewiesen werden. Durch besondere Konstruktion der Detektorsonden läßt sich feststellen, an welchem Ort im Körper sich das strahlende Nuklid befindet, und so kann man den Weg der strahlenden Substanz im

menschlichen Körper von außen völlig schmerzlos für den Patienten beobachten. Dafür sind natürlich nur solche Radionuklide einsetzbar, die Gammastrahlen aussenden, da Gammastrahlen das Körpergewebe mit nur geringer Absorption durchdringen, während Alpha- und Betastrahlen bereits in dünnen Gewebeschichten völlig absorbiert werden.

Strahlenbelastung bei nuklearmedizinischen Tests

Nun drängt sich hier die Frage auf: Ist es nicht zu gefährlich, strahlende Substanzen in den Körper einzuführen? Einerseits ist man bestrebt, die gesamte Strahlenbelastung möglichst gering zu halten, andererseits gelangen bei diesen nuklearmedizinischen Methoden die Strahlenquellen direkt in den menschlichen Körper hinein und bestrahlen damit das Gewebe aus Nahdistanz.

Selbstverständlich sind diese Strahlenschutzprobleme für jedes nuklearmedizinische Verfahren sorgfältig untersucht worden. Es werden nur solche Verfahren eingesetzt, bei denen die Strahlenbelastung ähnlich wie bei Röntgenaufnahmen noch keinerlei Gefährdung für den Patienten bedeutet. Das ist durch die außerordentlich hohe Empfindlichkeit dieser Meßmethoden möglich – im Prinzip ist jedes einzelne Atom nachweisbar, dessen Kern gerade zerfällt und dabei Strahlung aussendet.

Die Strahlendosis, mit der ein Patient bei einer nuklearmedizinischen Untersuchung belastet wird, entspricht größenordnungsmäßig etwa der jährlichen Strahlenbelastung durch die Umgebungsstrahlung. Das ist offensichtlich vertretbar. Während einer Schwangerschaft allerdings werden nuklearmedizinische Untersuchungen im allgemeinen nicht durchgeführt, wenn sie nicht selbst der Diagnostik einer Schwangerschaftskomplikation dienen, weil der sich entwickelnde menschliche Organismus in diesen Phasen besonders strahlenempfindlich ist.

Strahlentherapie

Neben den diagnostischen Verfahren wird die Kernstrahlung auch zur Therapie insbesondere von Geschwulstkrankheiten eingesetzt. Die Strahlung schädigt Krebszellen stärker als gesunde Zellen, und auf diese Weise kann vielfach die Erkrankung zurückgedrängt oder ausgeheilt werden. In diesen Fällen gelten natürlich für die Strahlenbelastung des Patienten andere Grundsätze. Die Dosierung wird in jedem Einzelfall zur Erzielung des bestmöglichen Heilerfolges festgelegt.

In den folgenden Abschnitten werden als Beispiele einige medizinische Anwendungen von Radionukliden beschrieben, wobei – dem Rahmen dieser Darstellung entsprechend – die gerätetechnischen Gesichtspunkte im Vordergrund stehen, während spezielle medizinische Erläuterungen der Fachliteratur vorbehalten bleiben müssen.

Fehlfunktionen innerer Organe werden sichtbar

Aus der Vielzahl der erprobten Verfahren, die täglich in vielen Kliniken angewendet werden, wählen wir die Untersuchung der Schilddrüse und der Nieren aus. Gerade für diese Organe hat der Einsatz von Radionukliden zu wesentlichen Fortschritten geführt und große Bedeutung erlangt. Diese Untersuchungen sind heute Routineverfahren, sie haben ihren festen Platz in der klinischen Praxis.

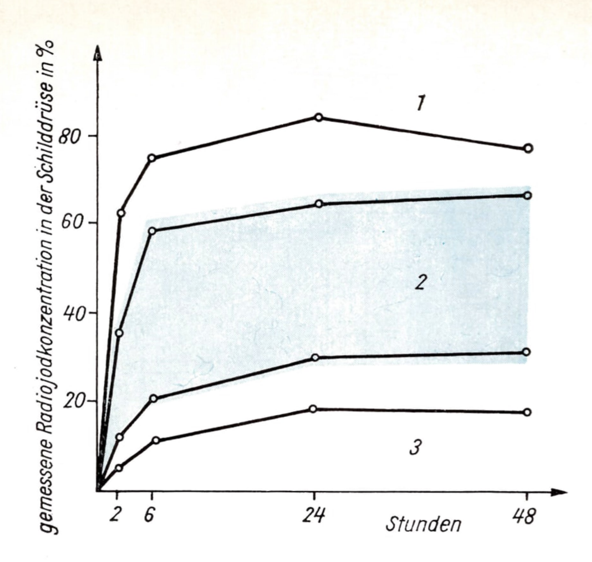
Schilddrüsentest

Für die Diagnose der Schilddrüsenfunktion gilt der Radiojodtest als ein zuverlässiges Verfahren. Die Schilddrüse steuert den Jodstoffwechsel im Körper, und Fehlfunktionen der Schilddrüse äußern sich in Veränderungen dieses Jodstoffwechsels.

Schilddrüse speichert Jod

Beim Radiojodtest wird daher die Speicherung des Jod 131 in der Schilddrüse durch Messungen verfolgt. Weil der Stoffwechsel für stabiles und radioaktives Jod völlig gleichartig abläuft, gelten die Meßwerte auch für das stabile Jod, das mit der Nahrung aufgenommen wird.

Das Verfahren ist relativ einfach: Der Patient trinkt in einer Flüssigkeit eine kleine Menge radioaktives Jod 131, dessen Aktivität etwa $4 \cdot 10^4$ Bq beträgt. Die



56 Radiojodkonzentration in der Schilddrüse. Die »Kreise« kennzeichnen die Meßergebnisse, die 2, 6, 24 und 48 Stunden nach der Einnahme des Radiojods erhalten worden sind. Die beiden mittleren Meßkurven befinden sich gerade noch im Bereich normaler Schilddrüsenfunktion
1 Beispiel für Überfunktion; 2 Bereich normaler Schilddrüsenfunktion; 3 Beispiel für Unterfunktion

Aufnahme und Speicherung dieses radioaktiven Jods in der Schilddrüse wird mit einer Sonde, die ein Stativ vor der Schilddrüse hält, registriert.
In Bild 56 ist die Jodspeicherung in der Schilddrüse während der 48 Stunden nach dem Probetrunk dargestellt. Der Normalbereich ist blau gekennzeichnet, und als Beispiele wurden zwei Verlaufskurven für die Jodspeicherung in den Normalbereich eingezeichnet. Bei einer Überfunktion der Schilddrüse liegt die gemessene Kurve über dem Normalbereich, und bei einer Unterfunktion verläuft die Meßkurve sehr flach.

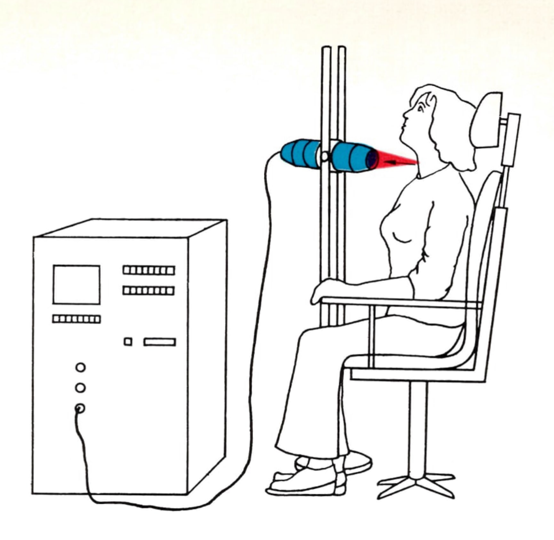
Ein Diagramm gibt Auskunft

Für beide Fälle sind in Bild 56 ebenfalls charakteristische Kurven eingezeichnet.
Die Meßwerte werden nach einem fest vorgegebenen Zeitprogramm aufgenommen. Vom Zeitpunkt der Jodaufnahme gerechnet, führt man die Messungen am Patienten meist nach 2, 6, 24 und 48 Stunden durch. Die Meßwerte werden in ein Diagramm eingetragen, und die Verbindung der Meßpunkte ergibt die in Bild 56 dargestellten Kurven.
Wie ist nun eine solche Meßanordnung für Schilddrüsenuntersuchungen aufgebaut?
Eine schematische Darstellung der Anordnung zeigt Bild 57. Der Patient sitzt auf einem Stuhl, und vor seinem Hals befindet sich in einem genau festgelegten Abstand eine Szintillationssonde, die durch ein massives Stativ in der eingestellten Position festgehalten wird. Der Abstand zwischen Halsoberfläche und der Sonde ist mit einem Meßstab fixiert. Die Position der Meßsonde zur Schilddrüse muß natürlich während der Messungen konstant bleiben, da sich anderenfalls die Empfindlichkeit der Anordnung ändern würde, was zu Meßfehlern führt.

Meßsonde mit Kollimator

In der Sonde befindet sich vor dem Szintillationszähler ein Kollimator, dessen Wirkungsweise Bild 58 zeigt. Er hat die Aufgabe, das Meßfeld auf den Bereich der Schilddrüse zu begrenzen. Die aus dem Bereich der Schilddrüse emittierten Gammaquanten gelangen ungehindert zur Szintillationssonde. Die Strahlung aus der Umgebung dagegen wird weitgehend durch den Bleikollimator abge-

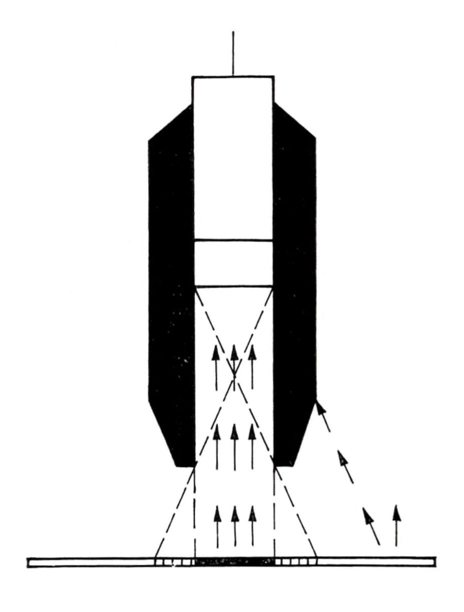
57 Meßanordnung für den Radiojodtest



schirmt. Der Szintillationszähler selbst wird ebenfalls zum Schutz gegen Umgebungsstrahlung von einer Bleiabschirmung umhüllt.
Szintillationszähler sind für den Einsatz in der Nuklearmedizin besonders gut geeignet, da sie eine sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber Gammastrahlung haben. Außerdem erlauben sie in Verbindung mit einem Einkanalanalysator eine energieselektive Messung der bei der Untersuchung benutzten Strahlung. Dadurch wird ebenfalls Störstrahlung, deren Strahlungsenergie außerhalb des eingestellten Kanals liegt, unterdrückt. So ermöglicht der Einsatz von Szintillationssonden, die Aktivität des Radionuklids und somit die Strahlenbelastung des Patienten sehr gering zu halten.

Signalverarbeitung durch Elektronik

Von der Szintillationssonde gelangen die von der Strahlung ausgelösten Signale, die elektrischen Impulse, in den elektronischen Teil der Meßanordnung. Dieser Elektronikteil enthält die Hochspannungsversorgung für den Szintillationszähler und sämtliche Einheiten, die für die Weiterverarbeitung der Impulse erforderlich sind. Die Impulse werden zunächst verstärkt und dann einem Einkanalanalysator zugeführt. Der Kanal dieses Analysators ist im vorliegenden Fall auf die Strahlungsenergie des Jod 131, also auf 364 keV, eingestellt. Sämtliche Impulse, deren



58 Schematische Darstellung eines Kollimators für Organuntersuchungen. Zum Detektor gelangt durch die Kollimatorwirkung nur Strahlung aus einem begrenzten Körperbereich

Amplituden diesem Energiewert entsprechen, werden durchgelassen und in dem nachfolgenden Zähler registriert. Die Meßanordnung enthält weiterhin einen Zeitgeber zur Steuerung des Zeitablaufs der Messungen. Die vom Zähler abgegebenen Meßwerte können z. B. mit einem Drucker registriert oder auch direkt auf einen Rechner zum Speichern und Weiterverarbeiten geleitet werden. Damit ist im wesentlichen eine Anordnung für Funktionsuntersuchungen mit Radionukliden beschrieben, die in ähnlicher Form auch zur Messung an vielen anderen Organen, z. B. Leber, Milz, Herz, eingesetzt wird. Bevor wir aber ein weiteres Beispiel, die Untersuchung der Nieren, erläutern, wollen wir noch einige Ausführungen zu Schilddrüsenuntersuchungen anschließen.
Zunächst muß noch einmal ausdrücklich betont werden, daß hier nur eine sehr vereinfachte, auf das Verständnis des Prinzips orientierte Darstellung möglich war – natürlich ist in der ärztlichen Praxis die Diagnose einer Schilddrüsenerkrankung wesentlich komplizierter. Die Jodspeicherung kann durch vorher eingenommene Medikamente beeinflußt worden sein, und manchmal muß die Diagnose durch weitere Untersuchungen gesichert werden.

Blutproben im Radioisotopenlabor

Bei dem Radiojodtest wird zusätzlich nach 48 Stunden eine Blutentnahme durchgeführt. Im Blut befindet sich ebenfalls radioaktives Jod 131, das z. T. in der Schilddrüse in Hormone eingebaut wurde, und der Meßwert für die Radioaktivität der Blutprobe gibt dem Arzt weitere Informationen zur Interpretation des für die Jodaufnahme der Schilddrüse ermittelten Kurvenverlaufs. Weiterhin wird der Radiojodtest immer durch die Aufnahme eines Szintigramms (vgl. S. 107) ergänzt, das die Schilddrüse abbildet.
An dieser Stelle ist auch zu erwähnen, daß z. B. für Schilddrüsenuntersuchungen ebenfalls Radionuklidmethoden eingesetzt werden, bei denen die strahlende Substanz überhaupt nicht erst in den menschlichen Körper gelangt.
Bei diesen Verfahren entnimmt man dem Patienten eine Blutprobe, und dieses Blut wird im Reagenzglas mit einer Probesubstanz vermischt. Dabei reagieren die Bestandteile des Blutes mit der Probesubstanz, und aus den Reaktionsprodukten kann man die speziellen Eigenschaften der Blutprobe, in denen sich z. B. der Funktionszustand der Schilddrüse widerspiegelt, erkennen.
Das ist ein sehr allgemeines Prinzip; zu einem Radionuklidverfahren wird es dann, wenn die Probesubstanz mit Radionukliden markiert ist. Und dabei kommt wieder die wesentliche Besonderheit aller Markierungsverfahren mit Radionukliden zur Geltung: Die Meßverfahren sind äußerst empfindlich, da Signale von einzelnen Atomkernen registriert werden können.
Nach dem Ablauf der Reaktion zwischen den Blutbestandteilen und der Probesubstanz im Reagenzglas werden die Reaktionspartner mit chemischen oder physikalischen Methoden getrennt. Dann wird die Radioaktivität der Reaktionsprodukte gemessen, und aus den ermittelten Aktivitätswerten lassen sich die Konzentrationen der Reaktionsprodukte, die Grundlage für eine Diagnose sind, sehr genau bestimmen.

In-vitro-Diagnostik

Diese Gruppe nuklearmedizinischer Verfahren werden unter dem Begriff In-vitro-Diagnostik zusammengefaßt. Die Bezeichnung in-vitro wurde aus dem lateinischen Wort vitrum, das Glas, abgeleitet und soll kennzeichnen, daß die für die Diagnosefindung entscheidenden Reaktionen im Reagenzglas stattfinden. Bei der routinemäßigen Anwendung dieser Methoden sind oft derart große Mengen an Meßproben zu verarbeiten, daß hierfür automatische Probenwechsler mit einer Kapazität von etwa 100 bis 400 Reagenzgläsern eingesetzt werden müssen. Das sind aufwendige Geräteanordnungen, in denen der An- und Abtransport der Meßproben zur Meßstelle durch eine mechanische Vorrichtung erfolgt. Manche Geräte sind weitgehend für einen automatischen Betrieb ausgelegt, spezielle Meßabläufe sind vorprogrammierbar.
Die großen Magazine dieser Probenwechsler fassen oft gleichzeitig die Meßproben mehrerer Arbeitsgruppen, und sie arbeiten auch nachts, ohne Aufsicht,

am Morgen entnimmt man dann die ausgedruckten Meßergebnisse von den Proben, die abends in den Automaten eingesetzt worden sind.
Gegenwärtig entwickelt sich diese in-vitro-Diagnostik außerordentlich rasch, ihr Einsatzbereich weitet sich auf eine große Zahl medizinischer Fragestellungen aus, und sie wird zu einem immer wertvolleren Instrument für die Diagnosefindung.

Nieren im Test

Die Untersuchung der Nierenfunktion mit Hilfe von Radionukliden hat ebenfalls große Bedeutung erlangt. Das Grundprinzip entspricht weitgehend dem beim Radiojodtest beschriebenen Verfahren. In diesem Fall wird allerdings die radioaktive Substanz in die Blutbahn des Patienten injiziert. Die Testsubstanz für diese Untersuchung muß sich vorwiegend und schnell in den Nieren anreichern. Dazu ist Hippursäure geeignet, die selbst aber noch nicht radioaktiv ist und daher mit J 131 markiert wird. Von dem Produkt, J-131-Hippurat, wird dem Patienten eine Aktivität von etwa 10^5 Bq injiziert. Bei der Reinigung des Blutes in den Nieren wird das gebundene Jod 131 für eine kurze Zeit in den Nieren konzentriert und anschließend mit dem Harn wieder ausgeschieden. Durch die Anordnung von Meßsonden über den Nieren lassen sich diese Vorgänge unmittelbar verfolgen. Dieses Untersuchungsverfahren wird Isotopennephrographie genannt.

Isotopen-nephrogramm

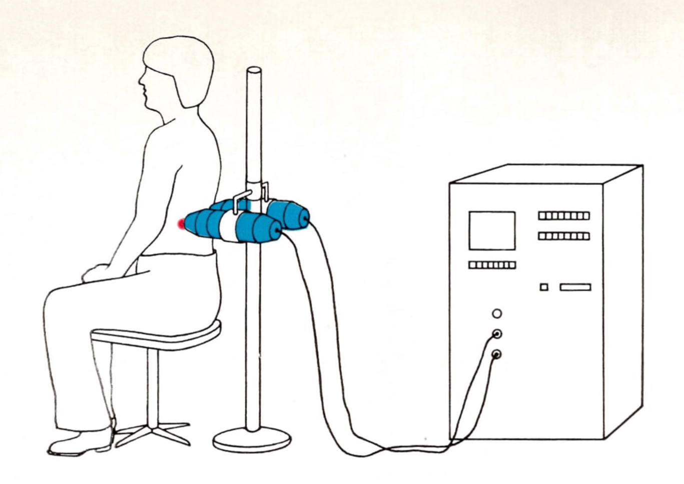
In Bild 59 ist schematisch eine Anordnung zur Aufnahme eines Isotopennephrogramms dargestellt. Dabei sind nur die beiden Meßsonden über den Nieren eingezeichnet, häufig wird zusätzlich mit zwei weiteren Meßsonden auch der Aktivitätsverlauf über dem Herzen und über der Blase registriert. Bei normaler Nierenfunktion erhält man ein Diagramm entsprechend Bild 60.
Nach der Injektion transportiert zunächst das Blut die injizierte Aktivität, die dann allmählich von den Nieren übernommen wird. Nach einigen Minuten hat die Aktivität in den Nieren das Maximum überschritten, und die strahlende Substanz gelangt mit dem Harn in die Blase. Störungen der Nierenfunktion erkennt der Arzt aus Abweichungen der gemessenen Aktivitätskurven von dem Normaldiagramm. Dabei ist besonders wertvoll, daß die Funktion jeder Niere einzeln untersucht werden kann – das geht bei Urinuntersuchungen nicht so einfach und nicht ohne Belästigung des Patienten.

Mehrere Meßkanäle

Während der Radiojodtest nur einen Meßkanal erfordert, werden bei der Isotopennephrographie 2 bis 4 Meßkanäle eingesetzt. Die Meßkanäle selbst sind aber bei beiden Verfahren weitgehend identisch: Die Szintillationssonde enthält einen Kollimator, der das Meßfeld auf Größe und Form des zu untersuchenden Organs begrenzt, und von der Sonde gelangen die Impulssignale in die Elektronikeinheit mit Verstärker und Analysator (Bild 61). Im Gegensatz zum Schilddrüsenmeßplatz schließt sich bei der Nierenuntersuchung an den Einkanalanalysator meist kein Impulszähler, sondern ein Impulsdichtemesser an, da der gesamte Meßvorgang bei der Nierenuntersuchung nur etwa 20 Minuten dauert. Durch den Anschluß eines Schreibers an den Impulsdichtemesser kann jetzt der Aktivitätsverlauf während 20 Minuten unmittelbar aufgezeichnet werden. Beim Radiojodtest hingegen werden für den Aktivitätsverlauf während 48 Stunden einzelne Meßpunkte ermittelt.

Ein Prinzip – viele Anwendungen

Die beschriebenen Meßmethoden stellen nur Beispiele für eine ganze Gruppe von Diagnoseverfahren dar. So sind mit ähnlichen Meßanordnungen u. a. auch Informationen über die Funktion des Herz-Kreislauf-Systems, der Leber oder der blutbildenden Organe zu erhalten. Aber die Beispiele können doch einen Eindruck vermitteln, wie die Fortschritte in der Kerntechnik auch in der Medizin völlig neue Möglichkeiten eröffnet haben. Es entstand ein neues Spezialgebiet, die Nuklearmedizin, deren Entwicklung bei weitem noch nicht abgeschlossen ist.



59 Meßanordnung für Nierenuntersuchungen

Impulsrate in willkürlichen Einheiten

3

2

1

0

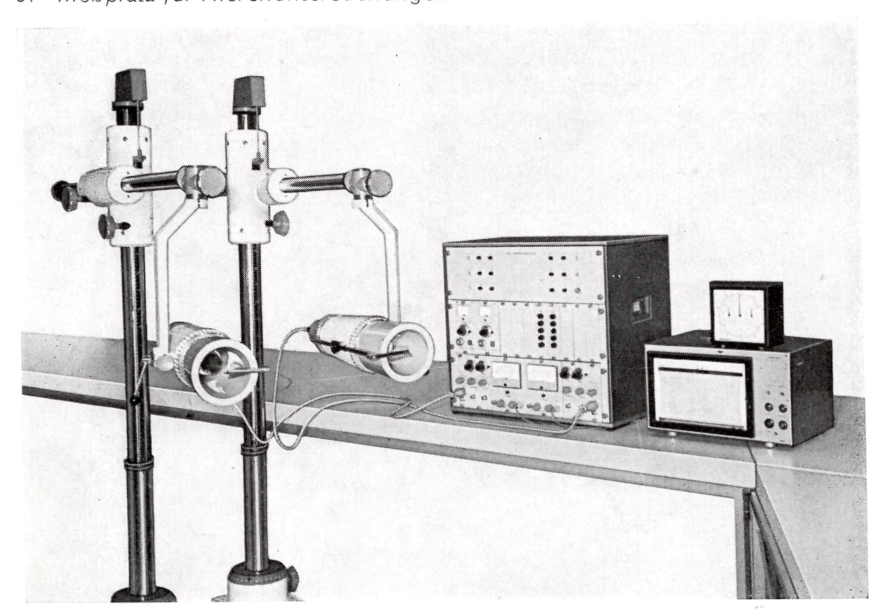
normale Funktion der Niere

10 20 30

Minuten

60 Über einer normal arbeitenden Niere aufgenommener Aktivitätsverlauf. Störungen der Nierenfunktion äußern sich in größeren Abweichungen von diesem Kurvenverlauf

61 Meßplatz für Nierenuntersuchungen



Testmessung am Auge

Ein weiteres nuklearmedizinisches Beispiel für eine sehr spezielle Untersuchung, die vergleichsweise selten erforderlich wird, ist der Radiophosphor-32-Test des Auges.

Entscheidungshilfe durch einen Test

Es ist schwierig, bei Geschwulsterkrankungen im Augeninneren eindeutig festzustellen, ob die Erkrankung gutartig ist oder ob eine bösartige Geschwulst vorliegt. Der Arzt steht dann vor einer schwerwiegenden Entscheidung: Wenn er in allen fraglichen Fällen das Auge entfernen würde, dann bestünde ein großes Risiko, bei einigen Patienten das Auge unnötig herausgenommen zu haben. Versäumt er aber eine erforderliche Operation, so besteht die Gefahr der Metastasenbildung.

Grundlage: Phosphoranreicherung im Tumor

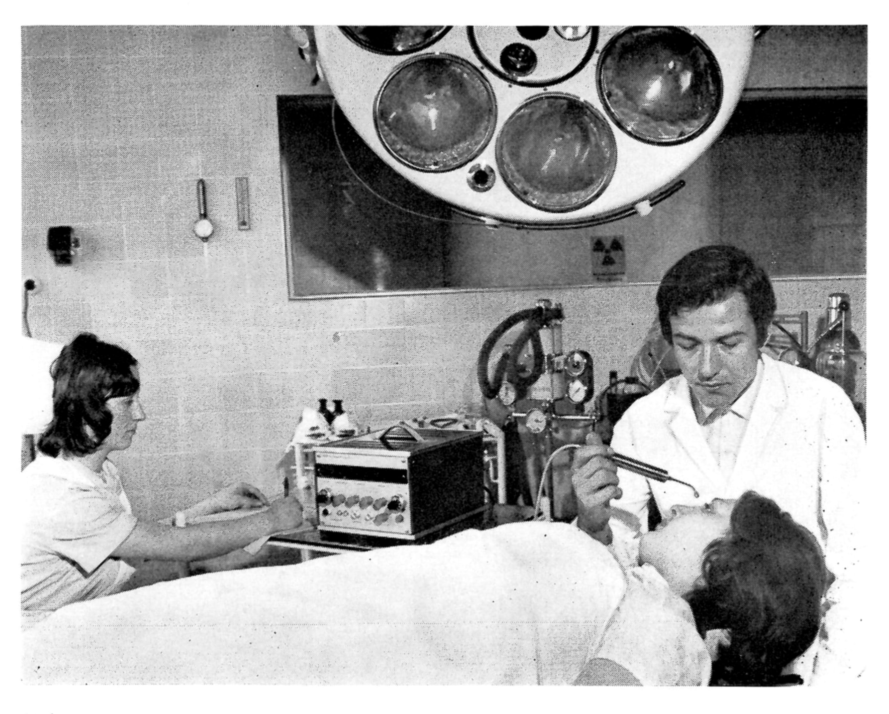
Bei dem Radiophosphortest benutzt man nun die Tatsache, daß Tumorgewebe einen höheren Prozentsatz Phosphor speichert als normales, gesundes Gewebe. Der Test wird folgendermaßen durchgeführt: Den Patienten wird eine Natrium-Phosphat-32-Lösung injiziert, wobei die Aktivität etwa $4 \cdot 10^5$ Bq je kg Körpergewicht beträgt. Nach 3 Tagen wird die aus dem verdächtigen Gebiet des Auges austretende Betastrahlung mit einer speziellen Sonde registriert und mit der Strahlungsintensität verglichen, die aus dem gesunden Teil des Auges ausgestrahlt wird. Aus dem Verhältnis der beiden Meßwerte läßt sich dann abschätzen, ob eine gutartige Veränderung oder eine bösartige Geschwulst vorliegt.

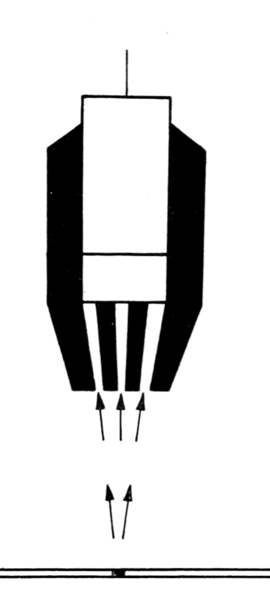
Meßsonde mit Halbleiterdetektor

Für den Radiophosphortest hat sich der Einsatz eines Halbleiterdetektors außerordentlich bewährt – er gestattet die Konstruktion einer kleinen und robusten Sonde, deren strahlenempfindliche Fläche der Meßaufgabe angepaßt werden kann.

Einen Eindruck vom Einsatz dieses Meßverfahrens in der medizinischen Praxis vermittelt Bild 62. Der Arzt hält die Meßsonde, an deren abgewinkeltem Ende sich der Halbleiterdetektor mit einer Fensterfläche von 25 mm² befindet. Die

62 Augentumor-Diagnostik-Meßplatz in der klinischen Praxis





63 Schematische Darstellung eines Kollimators für Szintiscanner. Zum Detektor gelangt durch die Kollimatorwirkung nur Strahlung aus einem fast punktförmigen Bereich

medizinisch-technische Assistentin bedient das Meßgerät, das die Betriebsspannung für den Detektor bereitstellt und die vom Detektor abgegebenen Impulssignale registriert.

Treffsicherheit der Diagnose

In der Literatur wird die Treffsicherheit des Radiophosphortests mit 90%···98% angegeben. Damit gilt der Radiophosphortest gegenwärtig als zuverlässige Methode zur Diagnose bösartiger Geschwülste im Auge.

Bilder innerer Organe durch Radionuklide

Zur Erläuterung dieser heute sehr wichtigen Verfahren erinnern wir uns an die Beschreibung der Funktionsmeßplätze für Niere und Schilddrüse. Dort wurde mit einem geeignet gestalteten Meßkopf die Strahlung aus dem gesamten Organbereich mit einer einzigen Messung erfaßt.

Nun ist aber im allgemeinen die strahlende Substanz nicht gleichmäßig in dem Organ verteilt, sondern die Konzentration des gespeicherten Radionuklids ist örtlich unterschiedlich. Wenn z. B. Teile des Organs in ihrer Funktion gestört sind, dann zeigt sich mit Hilfe geeigneter Präparate, daß in diesen Bereichen keine strahlende Substanz gespeichert wird. Ebenfalls wichtige Aussagen erhält der Arzt durch die Ermittlung der Organbegrenzungen, durch die Feststellung der genauen Größe und Lage des betreffenden Organs.

Wie kann man nun die Konzentrationsverteilung der strahlenden Substanz, die durch Injektion in den Körper gelangt ist, messen?

Radionuklidverteilung – wie messen?

Der Schlüssel zur Lösung dieser Meßaufgabe ist die spezielle Gestaltung eines Kollimators, der vor dem Strahlendetektor angebracht wird. Bei Funktionsmeßplätzen ist die Öffnung in dem Kollimator so ausgelegt, daß die Strahlung aus dem Organ erfaßt, die Strahlung aus der Umgebung jedoch abgeschirmt wird – die Kollimatoröffnung ist somit relativ groß.

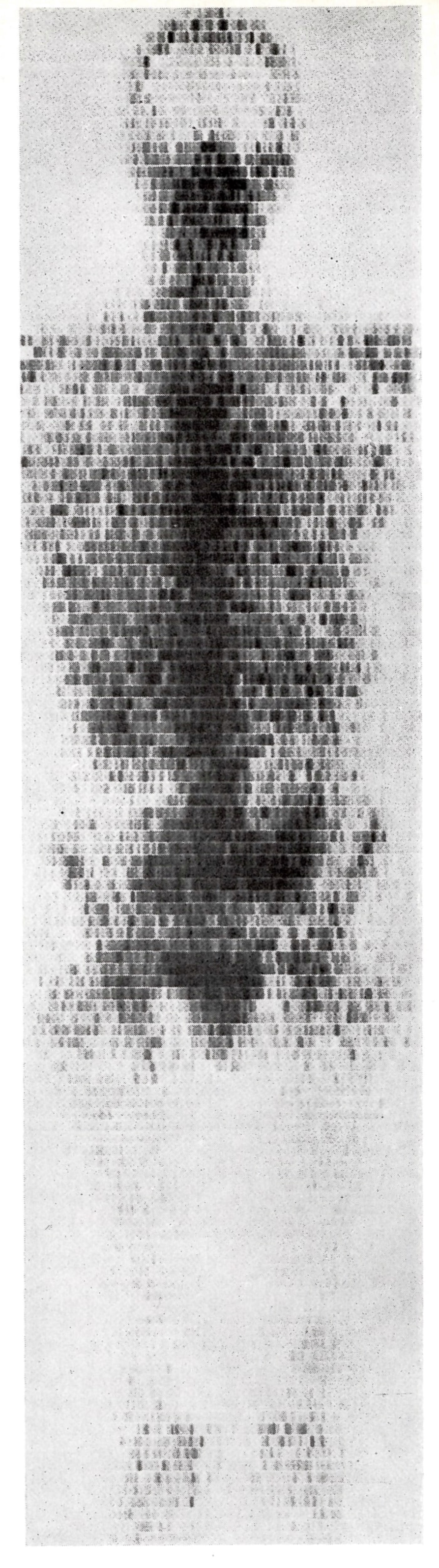
Die Lösung: Kollimator zur Bildaufnahme

Ganz anders ist aber die Meßaufgabe bei der Organdarstellung: Der gesamte Organbereich muß in sehr kleine, im Idealfall punktförmige Bereiche zerlegt werden, die in einer großen Zahl einzelner Strahlungsmessungen erfaßt werden. Das erreicht man mit sehr kleinen Kollimatoröffnungen. Im Bild 63 ist schematisch eine solche Meßkopfanordnung mit Kollimator dargestellt.

Um eine Abbildung von dem gesamten Organ zu erhalten, werden die vielen Einzelmessungen der kleinen Organbereiche mosaikartig zusammengesetzt.

Szintiscanner

Bei den Geräten für diese Meßaufgaben, den Szintiscannern, bewegt sich der



Meßkopf zeilenförmig, etwa wie der Elektronenstrahl in einer Fernsehbildröhre, über den auszumessenden Körperbereich. Vom Meßkopf gelangt für jeden registrierten Kernzerfall ein Impulssignal in den elektronischen Teil des Gerätes. Im Elektronikteil werden diese Signale so verarbeitet, daß ein Registriergerät gesteuert werden kann.

Meßwert-registrierung

In Szintiscannern sind Registrieranordnungen unterschiedlicher Konstruktion eingesetzt. Bei einem Typ von Registriergeräten bewegt sich ein Druckerkopf in gleicher Weise gegenüber dem Registrierpapier wie der Meßkopf über dem Patienten, und jedesmal, wenn vom Meßkopf eine bestimmte vorgewählte Impulszahl, die im Elektronikteil aufsummiert wird, abgegeben worden ist, stanzt der Druckerkopf eine Strichmarke auf das Papier. In Bereichen hoher Radioaktivität wird die vorgewählte Impulszahl sehr schnell erreicht. Die Strichmarken werden demzufolge in geringen Abständen ausgedruckt, sie liegen sehr dicht. In Bereichen geringer Aktivitätskonzentration dagegen liegen die Strichmarken weit auseinander, und so vermittelt die erhaltene Strichdichte eine Abbildung der Aktivitätsverteilung in dem untersuchten Körperbereich.

Szintigramme

Eine solche Abbildung wird Szintigramm genannt, ein Beispiel dafür zeigt Bild 64.

Für die medizinische Beurteilung sind allerdings möglichst kontrastreiche Szintigramme wünschenswert. In dieser Hinsicht wird eine Verbesserung gegegenüber den Strichmarken-Szintigrammen bei der Registrierung mit Farb-Szintigrammen erreicht. Dabei wird ein Druckwerk verwendet, das farbige Striche ausdruckt. Für einen bestimmten Impulsdichtebereich ist jeweils eine bestimmte Farbe vorgesehen, und so sind im Farb-Szintigramm die Gebiete gleicher Farbe auch die Gebiete mit etwa gleicher Radioaktivitätsanreicherung. Die Bereiche besonders hoher oder besonders niedriger Impulsdichte sind dann durch die Farbkennzeichnung nicht zu übersehen.

Szintiscanner zählen heute zur Grundausstattung jeder nuklearmedizinischen Arbeitsstelle. Man kann mit ihnen für viele Organe Abbildungen erhalten, aus denen Lage und Größe dieser Organe ersichtlich sind und die solche Bereiche erkennen lassen, in denen krankhaft verändertes, funktionsgestörtes Gewebe die Prüfsubstanz nicht mehr normal speichert.

Meßzeit für ein Szintigramm

Die Aufnahmezeit für ein Szintigramm beträgt allerdings bis zu 60 Minuten, 20 bis 30 Minuten sind durchaus übliche Meßzeiten. Das schränkt die Anwendung der Szintiscanner ein, denn die Aufnahme ist nur sinnvoll, wenn sich während der Meßzeit die Aktivitätsverteilung im untersuchten Bereich nicht ändert. Außerdem muß der Patient bei der Aufnahme seine Lage beibehalten.

Dieser Nachteil, der durch das zeitaufwendige Abtastverfahren entsteht und den Einsatz der Szintiscanner auf relativ langsam ablaufende Vorgänge beschränkt, hat dazu geführt, daß auf anderer physikalischer Grundlage verbesserte Geräte entwickelt worden sind.

Gammakamera mißt schneller

Das Ergebnis dieser Entwicklungsarbeiten ist die Szintillationskamera, auch Gammakamera genannt, die eine wesentliche Erweiterung nuklearmedizinischer Diagnoseverfahren ermöglicht hat. Allerdings ist diese Kamera auch das aufwendigste und teuerste Gerätesystem, das heute in der Nuklearmedizin eingesetzt wird.

Um die Funktionsweise der Gammakamera kennenzulernen, wollen wir das physikalische Grundprinzip erläutern. Dazu betrachten wir Bild 65, das eine schematische Darstellung des Meßkopfes zeigt. Der wichtigste Bestandteil dieser Anordnung ist der große Szintillatorkristall von etwa 30 cm Durchmesser. Vor dem Kristall befindet sich ein Kollimator, der nur die senkrecht auf den Meßkopf auftreffenden Strahlen zum Szintillatorkristall durchläßt. Die Größe

Aufbau des Meßkopfes

64 Ganzkörperaufnahme im Farb- und Strich-Szintigramm

dieser Kombination aus Kollimator und Kristall ist nun so bemessen, daß die gesamte zu untersuchende Organfläche, z. B. beide Nieren, beide Lungenflügel oder die Leber, gleichzeitig mit einer Strahlenmessung erfaßt wird. Der Meßkopf steht somit fest über der zu untersuchenden Körperregion, er bewegt sich nicht wie beim Szintiscanner.

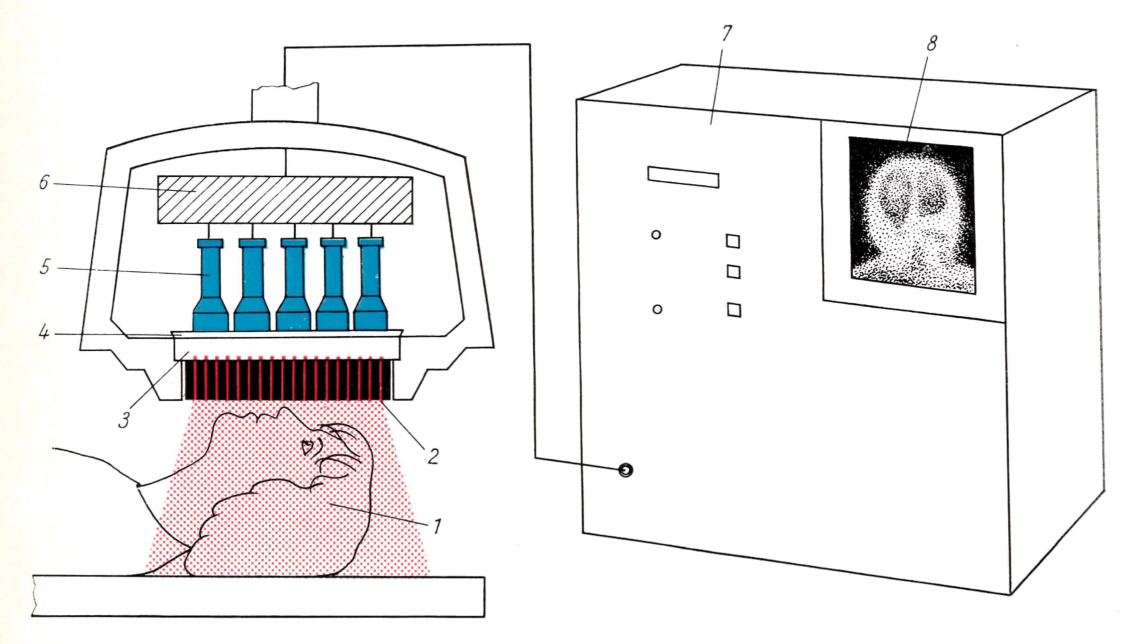
Idee für Signalbildung: Lichtverluste im Kristall

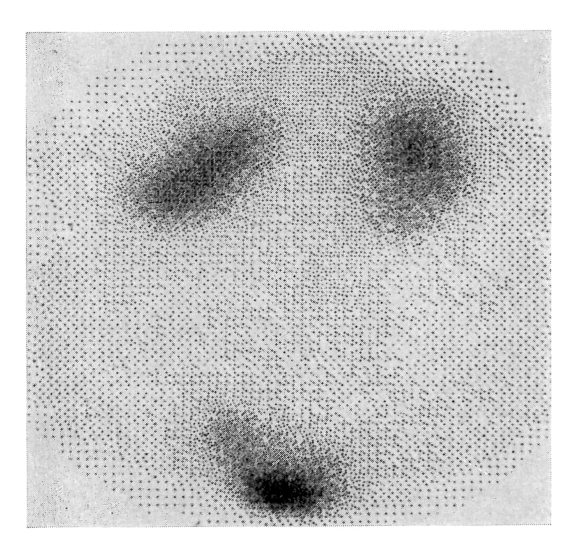
Die Bewegung des Meßkopfes beim Szintiscanner hatte aber eine wichtige Funktion – die Zuordnung des Meßwertes zu einem bestimmten Meßort. Diese Zuordnung wird bei der Gammakamera dadurch erreicht, daß hinter dem großen Szintillatorkristall mehrere Sekundärelektronenvervielfacher angeordnet sind. Bei jedem Lichtblitz, der durch ein Gammaquant im Kristall erzeugt wird, geben alle SEV einen elektrischen Impuls ab, dessen Amplitude aber bei jedem SEV eine andere Größe hat. Die vom Entstehungsort des Lichtblitzes weit entfernten SEV werden offensichtlich von einer geringeren Lichtmenge getroffen als diejenigen SEV, die sich in der Nähe des Lichtblitzes befinden. Und dementsprechend sind die Impulsamplituden bei den vom Lichtblitz entfernt gelegenen SEV auch kleiner als bei den SEV, die sich näher am Ort des Lichtblitzes befinden.

Strahlende Bereiche »fotografiert«

Die Signalimpulse werden in einer speziellen Elektronikeinheit im Gerät ausgewertet, und dabei wird aus den Impulsamplituden der Entstehungsort des Lichtblitzes rekonstruiert. Jeder Lichtblitz im Kristall, der einem absorbierten Gammaquant entspricht, erscheint nach der Weiterverarbeitung in dem Elektroniksystem als Lichtpunkt auf dem Bildschirm. Dieser Lichtpunkt liegt genau an dem Bildschirmort, der dem Punkt auf der Meßfläche, dem untersuchten Körperbereich, entspricht. Durch die Menge der Bildpunkte entsteht dann auf dem Bildschirm eine Abbildung der in dem Körperbereich gemessenen Aktivitätsverteilung. Diese Abbildungen können für die weitere Auswertung

65 Schematische Darstellung einer Gammakamera
1 *Kopf des Patienten. Durch »rot« ist die von dem aufgenommenen radioaktiven Präparat ausgesandte Gammastrahlung gekennzeichnet;* 2 *Kollimator;* 3 *Szintillator;* 4 *Lichtleiter;* 5 *SEV;* 6 *Elektronikeinheit;* 7 *Elektronikzentraleinheit;* 8 *Bildschirm mit abgebildetem Kopf*





66 Aufnahme mit der Gammakamera. Darstellung der beiden Nieren (oben) und der Blase (unten) 15 Minuten nach Injektion von J-131-Hippurat

fotografisch festgehalten werden. Ein Beispiel für solche Aufnahmen zeigt Bild 66.
Zur Verbesserung der Erkennbarkeit von Aktivitätsunterschieden wird oft – ähnlich wie im Farb-Szintigramm – das Bild mit einem Farbfernsehgerät mehrfarbig dargestellt.

Ergebnisoptimierung durch Rechner

Eine ganz wesentliche Verbesserung der Leistungsdaten dieser Kamerasysteme erreicht man jedoch, wenn man einen Rechner in das Gerätesystem einbezieht. Damit können die Meßergebnisse optimal und schnell für die Diagnosefindung ausgewertet werden; es würde allerdings zu weit führen, diese Rechenverfahren hier zu erörtern.

Aufnahmezeiten

Heute gehört die Szintillationskamera zur Grundausrüstung großer nuklearmedizinischer Abteilungen. Die Bildaufnahme erfordert nur noch wenige Minuten, es sind auch Aufnahmen in Bruchteilen von Sekunden möglich. Damit sind biologische Vorgänge erfaßbar geworden, die zu einer relativ schnellen Änderung der Aktivitätskonzentration führen, z. B. auch bestimmte Untersuchungen am Blutkreislauf. Daneben aber werden Szintiscanner auch weiterhin dann eingesetzt, wenn die spezielle Meßaufgabe nicht den Einsatz der wesentlich aufwendigeren Gammakamera erfordert.

Strahlen helfen heilen

Bisher haben wir kennengelernt, wie Radionuklide zur Diagnosefindung eingesetzt werden. Strahlende Substanzen werden jedoch auch für die Therapie, die Heilbehandlung, benutzt.
Während Diagnoseverfahren mit Radionukliden täglich in großer Anzahl durchgeführt werden, ist die Behandlung mit Kernstrahlung nicht derart weit verbreitet, sie ist auf einige Anwendungsfälle begrenzt. Bei diesen inzwischen langjährig erprobten Anwendungen hat die Behandlung mit Kernstrahlungsquellen jedoch zu bemerkenswerten Fortschritten geführt. Bei bestimmten Krankheitsbildern ist die Behandlung mit Kernstrahlung zu einem Standardverfahren geworden.
Dabei kann man die Verfahren in drei Gruppen einordnen: Bei der einen Gruppe verteilt sich die strahlende Substanz direkt im Körper bzw. in der zu bestrahlenden Körperregion, z. B. in einem Organ. Bei der zweiten Gruppe werden einzelne Strahlenquellen oder bestimmte geometrische Kombinationen dieser Quellen mit der Körperoberfläche, vor allem auch mit der Oberfläche in

Körperhöhlen, in Kontakt gebracht. Bei der dritten Gruppe werden Körperteile von außen bestrahlt, und die Strahlenquelle hat einen bestimmten Abstand vom Körper.

Bestrahlung »von innen«

Für die erste Gruppe, bei der die strahlende Substanz entweder mit einem Probetrunk oder durch Injektion in den Körper gelangt, wollen wir nun ein Beispiel erläutern.

Therapie für Schilddrüsenüberfunktion

Eine Überfunktion der Schilddrüse läßt sich mit radioaktivem Jod 131 erfolgreich behandeln. Die mit einer Flüssigkeit getrunkene strahlende Substanz gelangt über den Magen und mit dem Blutstrom in die Schilddrüse. Dabei ist die Aktivität um Größenordnungen höher als beim Radiojodtest.

Das in der Schilddrüse aufgenommene Jod 131 zerstört hier durch die Strahlenwirkung einen Teil des Gewebes, das dann für die Arbeitsweise der Schilddrüse nicht mehr zur Verfügung steht. So wird die Funktion der Schilddrüse herabgesetzt, die Überfunktion wird normalisiert.

Man kann die Schilddrüsenüberfunktion auch durch Operation behandeln. Dabei wird die Überfunktion sofort beseitigt, während bei der Behandlung mit Radiojod Monate vergehen, bis die volle Wirkung eintritt. Das hat aber den Vorteil, daß durch die langsame Umstellung der Schilddrüsenfunktion Nebenwirkungen in geringerem Maße auftreten. Außerdem ist diese Behandlung für den Patienten wenig belastend, sie kann auch durchgeführt werden, wenn eine Operation wegen des Gesundheitszustandes des Patienten nicht angebracht erscheint. Die Vor- und Nachteile der verschiedenen Verfahren muß in jedem Einzelfall der Arzt abschätzen. Er schlägt dann den erfolgversprechendsten Weg für die Heilbehandlung vor.

Strahlende Nadeln

Bei der Kontakttherapie werden z. B. nadelförmige radioaktive Co-60-Stifte in sogenannte Applikatoren gepackt und zur Bestrahlung gynäkologischer Tumore verwendet. Ähnlich erfolgt die Bestrahlung von Tumoren in anderen Körperregionen, z. B. in der Mundhöhle, im Kieferbereich oder am Kehlkopf. In diesen Fällen sind die Strahlenquellen in Kunststofformen eingebettet, die der anatomischen Form und der Lage des Tumors speziell für jeden Patienten angepaßt werden.

Bestrahlung »von außen«

Für die dritte Gruppe ist die Geschwulstbehandlung ebenfalls das Hauptanwendungsgebiet. Bestrahlungsanlagen mit Kernstrahlungsquellen sind weit verbreitet. Daneben werden bestimmte Geschwulstarten aber auch mit Röntgenanlagen bestrahlt, und gegenwärtig erlangt die Strahlenbehandlung mit Elektronenbeschleunigern rasch wachsende Bedeutung.

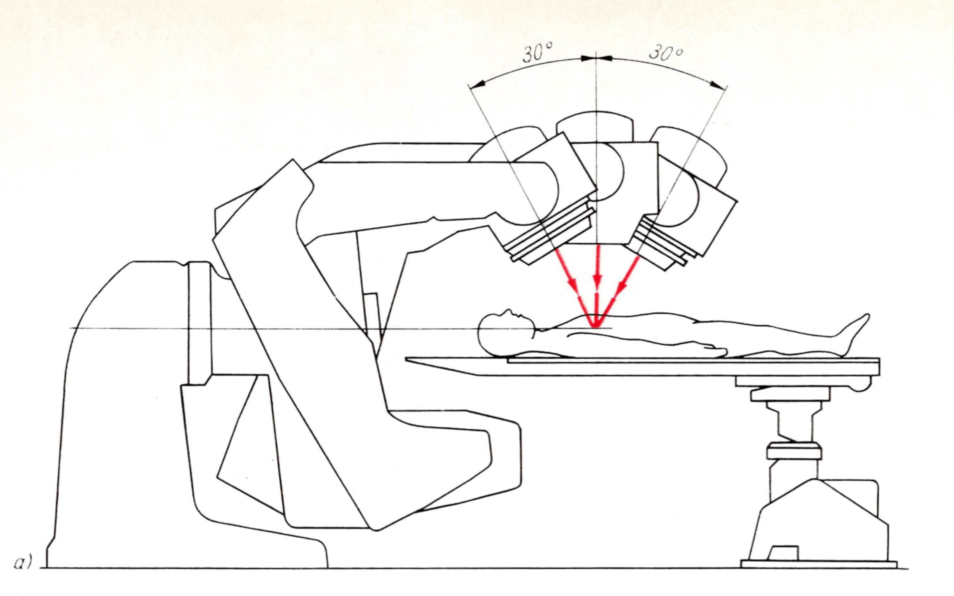
Quanten- oder Teilchenstrahlung zerstört das krankhaft entartete Gewebe. Dabei wird aber auch das gesunde Gewebe in der Umgebung des Krankheitsherdes mit bestrahlt und geschädigt. Natürlich nutzt man alle technischen Möglichkeiten, die Strahlenbelastung des gesunden Gewebes so gering wie möglich zu halten, aber diese unerwünschte Bestrahlung läßt sich nicht völlig vermeiden. Für den Behandlungserfolg wirkt sich dabei ein Sachverhalt sehr günstig aus: Bei gleicher Strahlendosis wird das schnell wachsende, krankhaft entartete Gewebe stärker geschädigt als die gesunden Gewebeteile.

Bis zur Entwicklung der Kerntechnik nach dem zweiten Weltkrieg stand für Kernstrahlungsquellen im wesentlichen nur Radium zur Verfügung. Radium aber ist teuer. Es muß in aufwendigen Bergbauverfahren gewonnen werden, und es war nicht genügend vorhanden, um den gesamten Bedarf abdecken zu können. Radium wurde zur Kontakttherapie in kleinen umschlossenen nadelförmigen Quellenträgern verwendet.

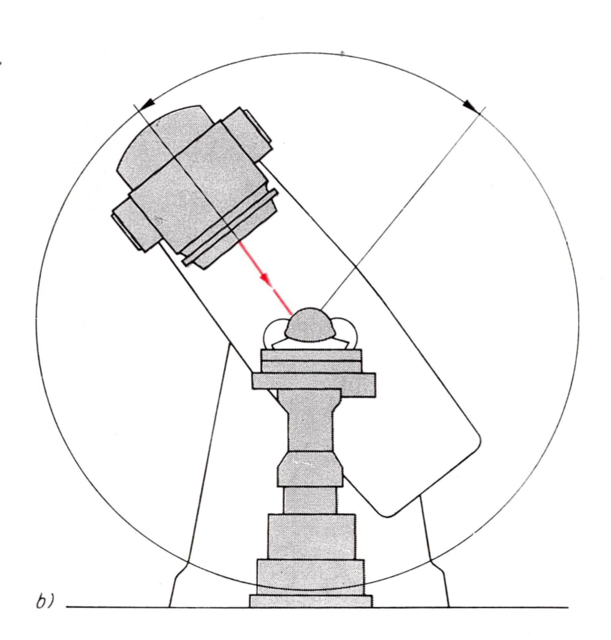
Das war die Situation, bevor mit Reaktoren oder Beschleunigern Radionuklide künstlich erzeugt wurden. Dann aber eröffneten sich völlig neue Möglichkeiten: Künstlich hergestellte Radionuklide waren jetzt in ausreichenden Mengen verfügbar, und ihr Preis war für den Einsatz in Bestrahlungsanlagen und als um-

Quellen für Bestrahlungsanlagen

schlossene Quellen für die Kontakttherapie akzeptabel. Heute wird hauptsächlich das radioaktive Kobaltisotop Co 60 für beide Anwendungsbereiche ein-



67 Bestrahlungsanlage mit Kernstrahlungsquelle. Durch Drehen der Strahlenquelle wird eine Verringerung der Bestrahlung gesunden Gewebes erreicht



gesetzt. Die große Verbreitung von Bestrahlungsanlagen mit Kernstrahlungsquellen wurde überhaupt erst durch die Verwendung künstlicher Radionuklide möglich. Radioaktives Zäsium und Iridium setzt man ebenfalls in solchen Bestrahlungsanlagen ein.

Derartige Anlagen haben sich heute weltweit bewährt und schon vielen Menschen Heilung oder Besserung ihres Leidens gebracht. In Bild 67 ist eine solche Bestrahlungsanordnung dargestellt. Die Anlage befindet sich in einem speziell dafür eingerichteten Bestrahlungsraum, dessen Wände aus Strahlenschutzgründen verstärkt sind. Das Gerät wird während des Bestrahlungsvorgangs fernbedient, und die medizinisch-technische Bedienkraft kann während der Steuerung des Gerätes den Patienten durch ein Bleiglasfenster beobachten. Aus der Darstellung ist ersichtlich, daß die Strahlenquelle während der Be-

Fernsteuerung

handlung auf einer Kreisbahn um den Patienten geführt wird. Diese geometrische Anordnung verringert die Strahlenbelastung des gesunden Gewebes, da bei optimaler Einstellung die gesunden Bereiche durch die Drehung der Strahlenquelle immer nur zeitweise belastet werden, während der Krankheitsherd, der sich im Mittelpunkt der Kreisbahn befindet, ständig der Strahlung ausgesetzt ist. Nach Beendigung der Strahlenbehandlung wird die Strahlenquelle wieder so abgeschirmt, daß der Bestrahlungsraum gefahrlos begehbar ist.

Die Strahlenbehandlung ist natürlich nur eine der Waffen im Kampf gegen den Krebs. Stets muß der Arzt in jedem Einzelfall das aussichtsreichste Behandlungsverfahren ermitteln. Dabei sind neue Entwicklungen erkennbar, die auf längere Sicht eine weitere Verbesserung der Strahlenbehandlung versprechen.

Beschleuniger – eine Hoffnung?

Gegenwärtig werden zunehmend Elektronenbeschleuniger für die Strahlentherapie eingesetzt. Die Geschwulstbehandlung durch Neutronenbestrahlung ist in der DDR und im Ausland praktisch erprobt worden, und es ist eine Weiterentwicklung dieser Behandlungsmethode zu erwarten.

Günstige Eigenschaften für die Geschwulstbestrahlung hat ein durch Beschleuniger erzeugter Protonenstrahl: Er gestattet die Konzentration der Energieabgabe auf einen sehr kleinen Gewebebereich, die gesunde Umgebung wird dementsprechend weniger geschädigt. Zu diesem Problemkreis werden Forschungsarbeiten durchgeführt. Sie sind aber durch die für die Erzeugung des Protonenstrahls benötigten aufwendigen und großen Beschleunigungsanlagen eingeschränkt.

Noch bessere Bestrahlungsergebnisse sind theoretisch mit π-Mesonen zu erwarten, die ebenfalls mit Hilfe von Großbeschleunigern erzeugt werden können. Bei Strahlenbündeln aus π-Mesonen kann die Energieabgabe noch stärker als bei einem Protonenstrahl auf einen vorgegebenen Bereich konzentriert werden – eine entscheidende Voraussetzung für die Zerstörung des kranken Gewebes bei größter Schonung des umgebenden gesunden Gewebes. Leider sind Untersuchungen mit π-Mesonen im Vergleich zu denen mit Protonen noch sehr viel kostspieliger, so daß hier praxiswirksame Fortschritte, die mit dem Bau neuer Großanlagen verbunden sind, nicht kurzfristig erwartet werden können. Der Einsatz für den Patienten wird deshalb in absehbarer Zeit nicht möglich sein. Aber es wird intensiv an diesen neuen Bestrahlungsverfahren gearbeitet, und zwar besonders in der Sowjetunion und in den USA.

Strahlenabsorption und ihre Nutzung



Fehlererkennung an Werkstücken

Schattenbilder

Jeder kennt Röntgenaufnahmen, die bei medizinischen Untersuchungen angefertigt werden. Diese Aufnahmen zeigen Strukturen im Körperinneren als Schattenbild.

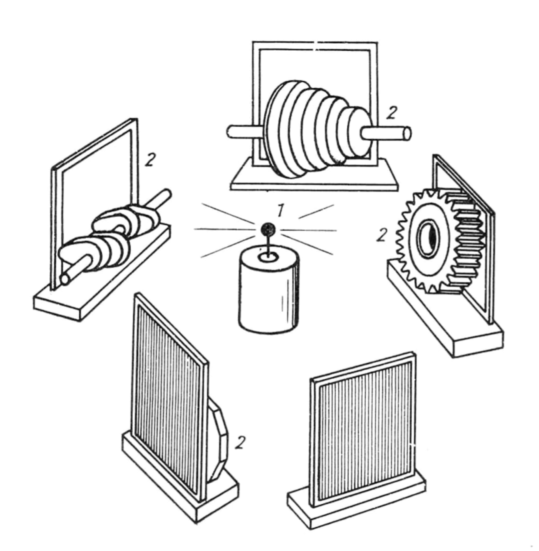
Mit dieser Röntgentechnik kann man natürlich auch solche Objekte wie Maschinenteile auf Fehler untersuchen, um die Funktionssicherheit der Maschine zu gewährleisten.

Der Einsatz von Röntgenstrahlen für diese Kontrollaufgaben ist aber sehr begrenzt – selbst mit aufwendigen Röntgenanlagen lassen sich nur Metallteile von höchstens zwei bis drei Zentimetern Metallstärke durchleuchten. Und bereits dafür ist eine Hochspannung an der Röntgenröhre von einigen 100 kV erforderlich. Dadurch entstehen große, schwere und komplizierte Anlagen, deren Transport bei wechselndem Einsatzort problematisch ist, und die Abmessungen der Röntgenstrahlenquelle verhindern den Einsatz an schwer zugänglichen Stellen.

Strahlenquellen für Gammadefektoskopie

Diese Schwierigkeiten sind durch die Anwendung von Kernstrahlungsquellen überwunden worden. Künstlich erzeugte Radionuklide haben die Möglichkeiten der Materialprüfung wesentlich erweitert. In Bild 68 ist schematisch eine Anordnung zur Durchstrahlung von Werkstücken mit einer Kernstrahlungsquelle dargestellt. Auf der einen Seite des zu durchstrahlenden Materials, hier im Mittelpunkt der kreisförmig angeordneten Maschinenteile, befindet sich die Gammastrahlenquelle *1*. Die emittierte Gammastrahlung tritt durch den zu untersuchenden Prüfkörper *2* hindurch und trifft die auf der anderen Seite der Probe angeordnete strahlenempfindliche Fotoschicht. Diese Kernemulsion wird durch die Gammastrahlung geschwärzt, und zwar ist der Grad der Schwärzung davon abhängig, welche Strahlungsintensität der Probekörper an der betreffenden Stelle durchläßt, also wie dick das Material an dieser Stelle ist.

Die Fotoschicht wird nun eine genügend lange Zeit bestrahlt und dann entwickelt. Die Stellen des untersuchten Körpers, die besonders starkwandig sind, bleiben auf dem Film verhältnismäßig hell, da sie infolge der größeren Absorption wenig Strahlung durchlassen. Wenn aber der Weg der Strahlung in dem Testkörper kürzer, das Werkstück an der betreffenden Stelle also dünner ist, dann wird weniger Strahlung absorbiert, und der Film ist am entsprechenden Ort schwärzer als im ersten Fall. Auf diese Weise gelingt es, von dick-

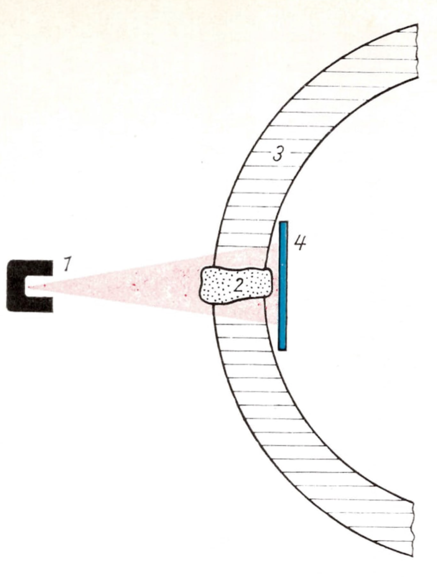


68 Anwendung von Kernstrahlungsquellen bei der Radiographie
1 *Strahlenquelle;* 2 *Prüfkörper*

wandigen Gegenständen, z. B. Gußstücken, Abbildungen anzufertigen, die leicht auszuwerten sind und innere Fehler im Werkstück erkennen lassen. Dieses Untersuchungsverfahren ist als Gammadefektoskopie bekannt.
Für die Gammadefektoskopie sind die wichtigsten Radionuklide Kobalt 60, Zäsium 137 und Iridium 192; gelegentlich werden auch Europium 154 und Thulium 170 benutzt. Die Auswahl des Gammastrahlers ist von der Materialstärke des zu prüfenden Werkstückes abhängig, und zwar verwendet man natürlich für dünnes Material weiche Gammastrahlung, während bei stärkeren Materialschichten die durchdringenderen energiereichen Gammaquanten geeignet sind. So wird bei Wanddicken von 50 bis 200 mm hauptsächlich Kobalt 60 benutzt, das verhältnismäßig energiereiche Gammaquanten mit 1,33 und 1,17 MeV Quantenenergie emittiert. Wenn die Stärke des zu durchstrahlenden Materials weniger als 70 mm beträgt, erreicht man mit Iridium 192, dessen Gammastrahlung eine mittlere Energie von 0,42 MeV hat, eine bessere Bildgüte als mit Kobalt 60. Für das Durchleuchten sehr dünner Prüfobjekte von nur wenigen Millimetern Durchmesser eignet sich die Gammastrahlung des Thulium 170 mit der mittleren Strahlungsenergie von 0,084 MeV.
Die Abmessungen von Kernstrahlungsquellen können sehr klein gehalten werden. Für eine hohe Bildgüte ist eine punktförmige Strahlenquelle erforderlich, und das läßt sich mit Radionuklidquellen weitgehend annähern. Kernstrahlungsquellen benötigen keine Hochspannung, keine komplizierten Zusatzeinrichtungen, und sie sind somit auch an schwer zugänglichen Stellen, z. B. im Inneren von Rohren, einsetzbar.

Prüfung von Schweißnähten

Die weitaus größte Zahl von Anwendungen der Gammadefektoskopie entfällt auf die Prüfung von Schweißnähten an Rohrverbindungen und Kesselteilen. Im allgemeinen führt man die Untersuchung einer Schweißstelle so durch, daß auf der einen Seite der strahlenempfindliche Film direkt aufgelegt wird, während sich auf der anderen Seite des Prüfobjektes die Strahlenquelle befindet, deren Strahlung die Schweißnaht durchdringt und Inhomogenitäten auf dem Film abbildet. Eine solche Anordnung ist schematisch in Bild 69 dargestellt.
Die hier kurz erläuterte radiografische Methode zur Materialkontrolle zählt heute zu den weltweit eingeführten Verfahren. Damit wurden neue Möglichkeiten für die Gütekontrolle eröffnet, deren hoher Nutzen allgemein anerkannt ist. Das Grundprinzip kann auch auf Sonderfälle ausgedehnt werden, und darauf spezialisierte Hersteller bieten dafür geeignete Meßanordnungen an.



69 Gütekontrolle der Schweißnaht in einem Rohr mit Hilfe der Gammadefektoskopie
1 Kernstrahlungsquelle; 2 Untersuchungsobjekt: Schweißnaht; 3 Metallrohr; 4 Filmkassette mit strahlungsempfindlichem Film

Neutronen finden Wasserstoff

Ein völlig anderer Anwendungsbereich wird bei der Materialdurchstrahlung mit Neutronen erschlossen: Neutronen werden hauptsächlich durch Zusammenstöße mit Wasserstoffkernen aus dem Strahlengang entfernt. Sie eignen sich damit zur Abbildung wasserstoffhaltiger Substanzen, also z. B. von Plasterzeugnissen, während sie starkwandige Metallschichten relativ ungeschwächt durchdringen.

Neue Technologie durch Strahlenwirkung

Bisher wurde fast ausschließlich der Einsatz von Radionukliden für neuartige Meßverfahren dargestellt. Eine Ausnahme war die Strahlentherapie – hier nutzt man die Wirkung der absorbierten Strahlendosis auf biologisches Gewebe. Analog dazu kann man auch die Wirkung der Strahlung auf bestimmte Substanzen ausnutzen. Dafür sind wesentlich höhere Strahlungsintensitäten als bei Meßaufgaben erforderlich, die durch den Einsatz von Radionuklidquellen mit sehr hoher Aktivität erreicht werden.
Bei der Absorption von Strahlung wird Strahlungsenergie auf das absorbierende Material übertragen. Dadurch entstehen Veränderungen in der absorbierenden Substanz. Diese Strahlenwirkung ist für eine große Anzahl möglicher Anwendungen in Instituten vieler Länder untersucht worden, und daraus haben sich inzwischen einige bewährte Verfahren, bei denen Großstrahlenquellen eingesetzt werden, ergeben.

Keimfrei durch Strahlung

Ein Beispiel dafür ist die Sterilisierung von medizinischem Verbrauchsmaterial. Für dieses Material, das z. B. bei Operationen verwendet wird, ist völlige Keimfreiheit eine unerläßliche Bedingung. Das kann mit ionisierender Strahlung erreicht werden – sie tötet bei genügend hoher Strahlendosis Mikroorganismen ab. Mit einer Strahlendosis von 25000 Gy ist im allgemeinen ein ausreichender Sterilisationsgrad gesichert.
Durch die wachsende Anwendung von wärme- und chemikalienempfindlichen Kunststoffen, die den Einsatz anderer Verfahren zur Sterilisierung dieser medizinischen Erzeugnisse einschränken, hat die Strahlensterilisierung im medizinischen Bereich zunehmend Bedeutung erlangt.
In diesen Bestrahlungsanlagen findet fast ausschließlich das Radionuklid Kobalt 60 Verwendung; die anfangs bevorzugten Elektronenbeschleuniger wurden im Verlauf der Entwicklung dieser Technik durch Kernstrahlungs-

quellen abgelöst. Während zu Beginn der sechziger Jahre weltweit lediglich 3 Bestrahlungsanlagen im Routinebetrieb eingesetzt waren, sind z. B. bei einer Bestandsaufnahme Ende 1975 in der gesamten Welt über 60 solcher Sterilisationsanlagen mit Kernstrahlungsquellen registriert worden.

Damit bleibt die Strahlensterilisierung natürlich ein Verfahren, das keinesfalls ausschließlich eingesetzt wird, sondern das mit anderen Sterilisationsmethoden in Konkurrenz steht. In jedem Einzelfall ist über das zu wählende Verfahren zu entscheiden. Die Statistik zeigt aber ein deutliches Vordringen der Strahlensterilisierung bei medizinischen Verbrauchsgütern, und das wird auf folgende Vorteile dieser Technik zurückgeführt: Die hohe Durchdringungsfähigkeit der Gammastrahlung ermöglicht es, die Sterilisationsgüter im Anschluß an den Produktionsvorgang erst hermetisch verschlossen zu verpacken und dann zu sterilisieren. Gegenüber anderen Verfahren ist der Arbeitsablauf vereinfacht und gewährleistet eine nahezu unbeschränkte Lagerfähigkeit des bestrahlten Gutes. Gammastrahlung bewirkt einen sofortigen und gleichmäßigen Sterilisationseffekt, und es treten dabei nur unbedeutende chemische Reaktionen im Sterilisationsgut auf.

Bestrahlung vollautomatisch

Aus diesen Gründen eignet sich die Strahlensterilisierung mit Kernstrahlungsquellen besonders für einen vollautomatischen Betrieb. Die Bestrahlungsanlage kann als Kettenglied in den kontinuierlichen Produktionsprozeß eingefügt werden, wobei die Strahlendosis, die sich durch Veränderung der Bestrahlungszeit regeln läßt, als einziger Parameter zu überwachen ist.

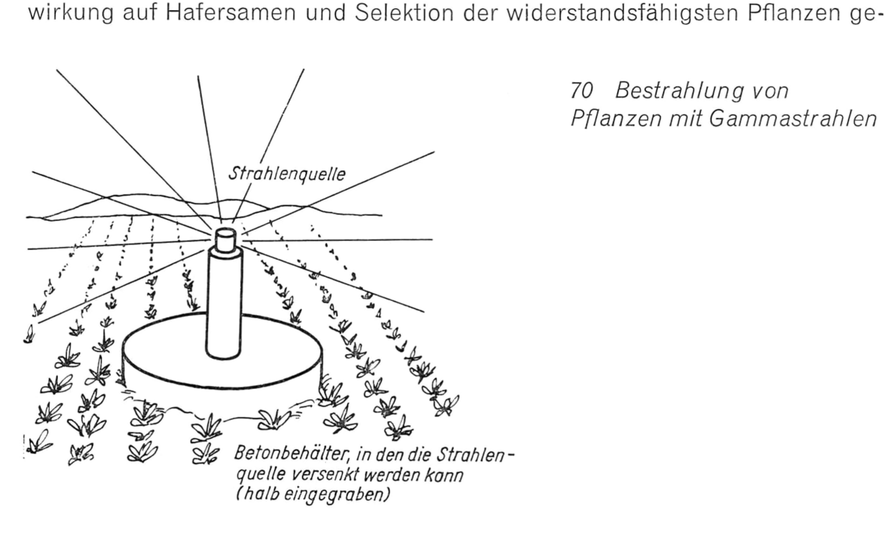
Strahlen verändern Erbanlagen

Strahleninduzierte Mutationen

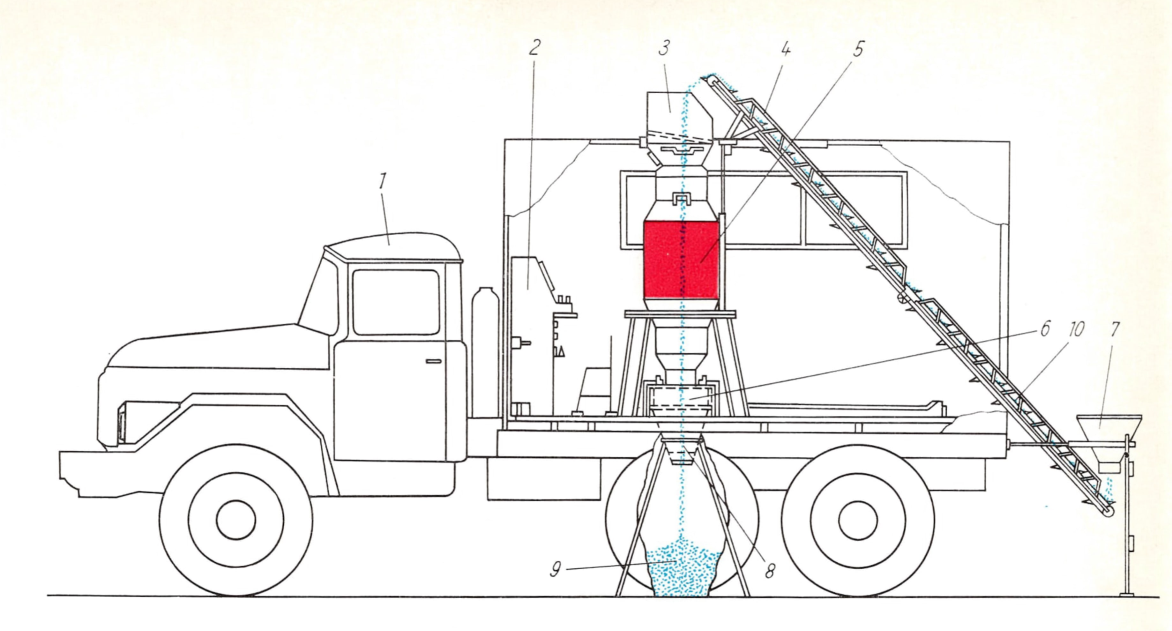
Eine ganz andere Strahlenwirkung wird bei der Bestrahlung von Pflanzen und Pflanzensamen ausgenutzt. Damit sind sehr interessante und ökonomisch wertvolle Ergebnisse erzielt worden. Besonders empfindlich gegenüber Strahlung sind die Samenzellen, in denen sich die Erbmasse befindet. Durch Bestrahlen ist es möglich, die Erbanlagen zu verändern. Solche Veränderungen der Erbmasse werden als strahleninduzierte Mutationen bezeichnet.

Im allgemeinen entstehen degenerierte Formen der bestrahlten Pflanze – die Bestrahlung wirkt sich also meist negativ aus. Durch systematische Auswahl gelingt es aber auch manchmal, bestimmte Eigenschaften einer Pflanzenart durch strahleninduzierte Mutationen zu verbessern. So gelang es schwedischen Wissenschaftlern, aus einer Gerstenart, die wegen ihrer Witterungsempfindlichkeit wenig angebaut wurde, durch strahleninduzierte Mutation eine verbesserte Sorte zu ziehen, die den günstigen Ertrag der ursprünglichen Gerstenart beibehalten hat und wesentlich unempfindlicher gegenüber Witterungseinflüssen ist. Erfolgreich war auch der Versuch, die Widerstandsfähigkeit von Hafer gegenüber Pilzerkrankungen zu erhöhen: Durch Strahleneinwirkung auf Hafersamen und Selektion der widerstandsfähigsten Pflanzen ge-

Saatgutbestrahlung



70 Bestrahlung von Pflanzen mit Gammastrahlen



71 Fahrbare Saatgut-Bestrahlungsanlage »Kolos« aus der UdSSR
1 *Kraftfahrzeug;* 2 *Steuerpult;* 3 *Bunker;* 4 *Becherförderer;* 5 *Bestrahlungseinheit;* 6 *Bandförderer;* 7 *Beschickungsbunker;* 8 *Entnahmebunker;* 9 *Sack für die Aufnahme des Saatgutes;* 10 *Saatgutstrom*

lang es, eine Hafersorte zu züchten, die von einer bisher häufig aufgetretenen Pilzkrankheit nicht befallen wird.
Für die Bestrahlung der Pflanzen und des Samens sind verschiedene Vorrichtungen im Einsatz. Mit Hilfe sehr starker Gammastrahlenquellen können die Pflanzen direkt auf dem Feld bestrahlt werden (Bild 70). Um den Strahlenschutz zu sichern, wird die Quelle durch Fernbedienung in den Betonbehälter versenkt oder in die Bestrahlungsstellung ausgefahren.
Eine ortsbewegliche Bestrahlungsanlage zeigt Bild 71. Diese sowjetische Bestrahlungseinheit »Kolos« ist auf einem speziell ausgestatteten Lastkraftwagen vom Typ SIL-131 montiert und dient zum Bestrahlen von Saatgut. Ihr Einsatz führt zu einem schnelleren Keimen des Samens und zu einer intensiveren Entwicklung der Pflanze, die oft auch früher ausreift. Dadurch kann der Ernteertrag erhöht werden.

Höhere Ernteerträge

Als Strahlenquelle wird im »Kolos« das Radionuklid Zäsium 137 mit einer Aktivität von etwa $13 \cdot 10^{15}$ Bq eingesetzt. Die spezielle Konstruktion der Kernstrahlungsquelle gewährleistet eine gleichmäßige Saatgutbestrahlung und einen kontinuierlichen Arbeitsablauf. Die Arbeitsweise läßt sich kurz folgendermaßen beschreiben: Mit einem Transportband wird das Saatgut in den Bunker der Bestrahlungseinheit befördert, dann durchfließt es die Arbeitskammer, wobei es mit der vorgewählten Strahlendosis bestrahlt wird, und gelangt über den Bandförderer in den Entnahmebunker. Vom Entnahmebunker wird das bestrahlte Saatgut in Säcke abgefüllt.
Sämtliche Operationen während der Bestrahlung werden vom Steuerpult aus gesteuert. Mit der Anlage »Kolos« kann das Saatgut mit einer Strahlendosis, die im weiten Bereich von 2 bis 50 Gy liegt, bestrahlt werden. Die Strahlendosis wird durch Änderung der Geschwindigkeit des Saatgutstromes geregelt.
Man muß jedoch sagen, daß der Einsatz dieser fortschrittlichen Technologie der Saatgutbestrahlung noch auf Sonderfälle beschränkt ist. In der Sowjetunion sind aber damit bemerkenswerte Steigerungen der Ernteerträge erzielt wor-

den. So wurde mit dem Einsatz der Anlage »Kolos« in der Landwirtschaft der Moldauischen SSR in den Jahren 1968 bis 1971 ein durchschnittlicher Anstieg der Maisernte um 8···16% und der Grünmasse (für Silofutter) um 9···18% erreicht. Im Pawlodargebiet der Kasachischen SSR sind z. B. nach Bestrahlung des Saatgutes vor dem Säen im Jahre 1971 die Ernteerträge für Weizen um 11%, für Gerste um 12%, für Sonnenblumenkerne um 21% und für Buchweizen um 16% gegenüber dem langjährigen Durchschnitt erhöht worden. Diese praktischen Ergebnisse vermitteln einen Eindruck vom ökonomischen Effekt, der mit dem Einsatz dieser Bestrahlungstechnologie zu erreichen ist.

Bestrahlte Lebensmittel

Riesige Verluste entstehen überall in der Welt ständig durch das Verderben von Nahrungsmitteln. Die Bestrahlung von Lebensmitteln zum Erhöhen ihrer Haltbarkeit wurde deshalb in vielen Ländern untersucht und ist auch gegenwärtig noch Gegenstand von Forschungs- und Testprogrammen. Es sind positive Ergebnisse erzielt worden. Allerdings hat sich auch herausgestellt, daß die Bakterien, die neben bestimmten biochemischen Reaktionen hauptsächlich das Verderben von Nahrungsmitteln verursachen, erst durch eine Strahlendosis von etwa 50000 Gy abgetötet werden. Bereits bei wesentlich niedrigeren Dosiswerten verändern aber die meisten Nahrungsmittel, und zwar besonders Fleisch, ihr Aussehen sowie Geruch und Geschmack. Wenn auch diese Veränderungen oft geringfügig sind, so bedeuten sie doch eine Beschränkung dieser Bestrahlungstechnik. Selbstverständlich werden von den zuständigen staatlichen Behörden außerordentlich sorgfältige Prüfungen gefordert, bevor die Genehmigung zum Verkauf bestrahlter Lebensmittel erteilt wird. In Tierversuchen muß durch Verfüttern der bestrahlten Nahrungsmittel über einen längeren Zeitraum die Unschädlichkeit nachgewiesen werden.
Bestrahlungsprogramme zur Verlängerung der Haltbarkeit sind u. a. für Fleischwaren, Fische, verschiedene Gemüsesorten und Obst, insbesondere für Erdbeeren, durchgeführt worden. Trotz teilweise günstiger Ergebnisse ist die Anwendung der Strahlensterilisierung bisher auf Einzelfälle beschränkt geblieben, und sie wird sicher nicht in absehbarer Zeit z. B. die Konservierung von Nahrungsmitteln durch Hitzeeinwirkung verdrängen. In einigen Fällen lassen sich jedoch durch Kombination von Hitze- und Strahlensterilisierung Vorteile erreichen.

Kartoffeln länger lagerfähig

Ein anderer Effekt wird beim Bestrahlen von Kartoffeln ausgenutzt – strahlenbehandelte Kartoffeln werden nicht durch Auskeimen zerstört. Dieses Verfahren zur Verlängerung der Lagerfähigkeit von Kartoffeln hat sich gut bewährt, und in mehreren Ländern, darunter auch in der Sowjetunion und in Ungarn, werden solche bestrahlten Kartoffeln bereits zum Verkauf angeboten. Damit könnte man auch den Einsatz von Chemikalien vermindern, die heute massenweise zum »Keimstopp« verwendet werden.

Strahlen gegen Schadinsekten

Großer Schaden entsteht in der Nahrungsmittelwirtschaft jedes Jahr durch Schädlinge wie Würmer und Insekten. Die Anstrengungen, die zur Entwicklung chemischer Schädlingsbekämpfungsmittel unternommen werden, sind beträchtlich. Dennoch führen diese chemischen Methoden nicht immer zu vollem Erfolg und stoßen in manchen Fällen auf prinzipielle Schwierigkeiten, da sich solche Schädlinge auch im Innern von Getreidekörnern oder unter Baumrinden befinden. Dann werden die Schädlinge von gespritzten Chemikalien nicht erreicht, während die Wirkung durchdringender Gammastrahlen durch diese Umstände nicht beeinträchtigt wird.
Besonders bei der Lagerung von Getreide und Mehl können durch Schädlinge große Verluste entstehen. Hier hat sich der Einsatz von Gammabestrahlungsanlagen gut bewährt. Bei Dosiswerten von 200 bis 500 Gy wird die Fortpflanzung von Insekten verhindert.

Originelles Verfahren

Ein sehr interessantes Verfahren zur Ausrottung bestimmter Insektenarten mit Hilfe von Gammastrahlen ist bereits mehrfach mit Erfolg angewendet worden. Das Verfahren soll an einem Beispiel erläutert werden.

Erhebliche Schäden entstehen durch eine Schmeißfliegenart, deren Larven sich im Muskelfleisch von Weidevieh entwickeln und beträchtliche Fleischstücke aus dem lebenden Tier herausfressen. Die Vernichtung dieser äußerst schädlichen Insekten wurde auf folgende Weise erreicht: Zunächst züchtete man eine große Anzahl dieser Fliegen und setzte sie einer Ionendosis von etwa 2 C/kg aus. Dadurch werden die Fliegen unfruchtbar, ihre anderen normalen Lebensfunktionen bleiben aber erhalten. Nun werden diese unfruchtbaren Insekten über dem Gebiet, das von den Fliegen befreit werden soll, mit Hilfe von Flugzeugen ausgesetzt. Sie paaren sich mit den nicht bestrahlten fruchtbaren Schmeißfliegen, es entstehen daraus aber keine Nachkommen. Auf diese Weise wurde die Generationsfolge unterbrochen, und die schädliche Schmeißfliegenart verschwand in den so behandelten Gebieten. Besonders erfolgreich läßt sich diese Methode zur Vernichtung von Insekten auf kleineren Inseln anwenden, da in diesem Fall keine Insekten wieder in die gesäuberten Gebiete eindringen können.

Ein weiteres Beispiel für dieses doch wohl originelle Verfahren ist die Bekämpfung der Mittelmeerfruchtfliege in Peru. Alljährlich ist durch diese Insektenart ein beträchtlicher Teil der peruanischen Ernte vernichtet worden. Mit internationaler Unterstützung hat man in Peru ein mehrjähriges Projekt zur weitgehenden Ausrottung dieser schädlichen Fliege in Angriff genommen. Dafür sind speziell konstruierte Gammabestrahlungsanlagen aufgebaut worden, mit deren Hilfe wöchentlich bis zu 200 Millionen künstlich aufgezogener Fliegen sterilisiert werden können.

Bisher haben wir die Strahlenwirkung auf Organismen und biologische Substanzen untersucht. Ein anderes vielschichtiges Gebiet ist die Ausnutzung von chemischen und physikalischen Veränderungen in unbelebter Materie bei Bestrahlung.

Hohe Dosis durch Beschleuniger

Dabei werden in der Regel sehr hohe Bestrahlungsleistungen benötigt, die im allgemeinen zum Einsatz von Beschleunigern als Strahlungsquelle führen. Radionuklidquellen erweisen sich für diese Anwendungen meist als weniger gut geeignet. Da wir uns hier aber weitgehend auf Radionuklidquellen beschränken wollen, soll die industriell durchgeführte Bestrahlung unbelebter Substanzen nur kurz umrissen werden.

Polymere werden verbessert

Ein Schwerpunkt bei der Vielzahl von speziellen Verfahren ist die Bestrahlung von Polymerwerkstoffen. Gerade bei Hochpolymeren treten starke Veränderungen durch Strahlenwirkung auf, die sich im industriellen Maßstab nutzen lassen. So entstehen z. B. in Polyäthylen, Polystyrol und Kautschuk durch Bestrahlen Vernetzungen der Makromoleküle, und oft lassen sich bessere thermische und mechanische Eigenschaften erreichen. Insbesondere erhöht sich die Formbeständigkeit bei Erwärmung – eine für viele Plastanwendungen wichtige Eigenschaft. Strahlenvernetzte Kabel werden auch in der DDR industriell hergestellt, und bei solchen kontinuierlichen Produktionsverfahren entstehen mit Hilfe der Strahlung hohe Erzeugniswerte.

Ein anderes Verfahren betrifft die Herstellung von Polyvinylchlorid. Im Zentralinstitut für Isotopen- und Strahlenforschung in Leipzig ist ein neuartiges Verfahren zur Produktion von kochfestem Polyvinylchlorid entwickelt worden, bei dem im Gegensatz zu der bisherigen sehr aufwendigen Technologie das PVC-Pulver mit Hilfe von Strahlung chloriert wird. Dadurch erhöht sich auch die Qualität dieses Kunststoffes, und die Entwicklungsergebnisse führen bei der industriellen Umsetzung zu hohem volkswirtschaftlichem Nutzen.

Strahlentechnologie mit vielen Möglichkeiten

Bestrahlungsanlagen werden heute u. a. zur Lackhärtung, zur Verbesserung der Gebrauchseigenschaften von Holz für Parkettfußböden und zur Textilveredlung eingesetzt. Jedes Jahr entstehen neue Ideen, und neue Anwendungsfälle werden erforscht. Jedoch erfordert die Einführung einer neuen Strahlentechnologie viele Jahre, und nur ein Teil der vielversprechenden Projekte endet auch mit einem ökonomischen Erfolg.

Radionuklidbatterien

Wenn im Rahmen der Kerntechnik von Energiegewinnung gesprochen wird, dann denkt man sofort an Kernkraftwerke. Heute ist die Erzeugung von Wärme- und Elektroenergie mit Kernreaktoren eine zentrale Aufgabe der technischen Entwicklung, die sich weltweit in umfangreichen Bauprogrammen für Kernkraftwerke widerspiegelt.

Strom aus Kernstrahlung

Zu einer völlig anderen Art von Energiequellen gelangt man jedoch, wenn die in der Strahlung der Radionuklide enthaltene Energie ausgenutzt wird.

Es gibt mehrere physikalische Effekte, die eine Umwandlung der Strahlungsenergie in Elektroenergie ermöglichen. Inzwischen hat es sich am günstigsten erwiesen, die Energie der Kernstrahlung zunächst in Wärme umzusetzen und dann Thermoelemente zur Erzeugung elektrischer Energie zu benutzen. Nach diesem Prinzip sind heute im allgemeinen die Radionuklidbatterien konstruiert, die sich im praktischen Einsatz befinden.

Eine schematische Darstellung einer solchen Batterie zeigt Bild 72. Im Mittelraum dieser Batterie befindet sich das radioaktive Material, das die Strahlung aussendet. Hauptsächlich werden Alpha- oder Betastrahlen benutzt, da diese Teilchenstrahlung im Absorber völlig abgebremst wird, während Gammastrahlen auch ungenutzt nach außen dringen und den Strahlenschutz erschweren würden. Durch die Absorption der Strahlung erwärmt sich der Absorber und heizt damit die Kontaktstellen der Thermoelemente auf.

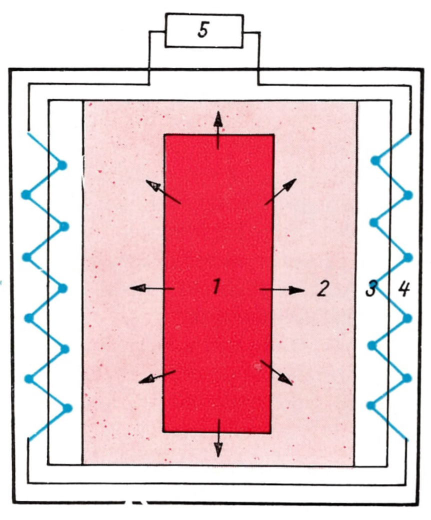
Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad, der in solchen Anordnungen erreicht wird, beträgt etwa 5%, das heißt, von der gesamten Strahlungsenergie, die der Absorber aufnimmt, können 5% als nutzbare Elektroenergie an den Klemmen der Thermoelemente abgenommen werden.

Dieser Wirkungsgrad ist gering – bei Kernkraftwerken dagegen kann ein Wirkungsgrad von etwa 35% erreicht werden. Zudem ist die Energiemenge in der Strahlung radioaktiver Substanzen ebenfalls klein, so daß heute mit wirtschaftlich vertretbarem Konstruktionsaufwand maximal einige Kilowatt elektrische Leistung von Radionuklidbatterien abgegeben werden können. Dennoch hat man in der Sowjetunion, in den USA und in anderen Ländern aufwendige Forschungsprogramme für die Entwicklung dieser Batterien durchgeführt, und es entsteht die Frage, welche besonderen Eigenschaften und Vorteile solche Radionuklidbatterien bieten.

Vorteile von Radionuklidbatterien

Anlaß für diesen Entwicklungsaufwand war die Chance, mit Radionuklidbatterien spezielle technische Aufgaben lösen zu können, für die es bisher



72 Grundschema einer Radionuklidbatterie
1 radioaktive Substanz; 2 Absorber, in dem die absorbierte Strahlung in Wärme umgesetzt wird; 3 Isolator, der durch den Absorber mit erwärmt wird; 4 Thermoelement, zwischen dessen warmen und kalten Kontaktstellen eine thermoelektrische Spannung entsteht; 5 Lastwiderstand als Verbraucher der erzeugten elektrischen Energie

keine Lösung gab. Radionuklidbatterien arbeiten über viele Jahre völlig wartungsfrei. Sie sind damit für schwierige Einsatzfälle, z. B. in abgelegenen Wetterstationen oder zur Stromversorgung in Raumflugkörpern, geeignet. Für solche Anwendungen sollen einige Beispiele angeführt werden, die inzwischen praktische Bedeutung erlangt haben.

In den letzten Jahren hat die Enwicklung von Herzschrittmachern in der Medizin bei der Behandlung bestimmter Herzerkrankungen zu wesentlichen Fortschritten geführt. Herzschrittmacher sind kleine Sender für elektrische Impulse, die direkt in den Körper des Patienten operativ eingesetzt werden. Die elektrischen Impulse dienen dazu, die Herztätigkeit bei dem Patienten zu stabilisieren, und diese Methode hat sich inzwischen in der Behandlungspraxis durchgesetzt. Für 1976 wurde geschätzt, daß in der ganzen Welt etwa 150000 Herzschrittmacher implantiert worden sind.

Diese Herzschrittmacher enthalten als Energiequelle fast ausschließlich herkömmliche Batterien. Das führt aber zu dem Nachteil, daß mit diesen Batterien der Impulssender nur etwa 4 Jahre betrieben werden kann – dann muß mit einer neuen Operation die Batterie ausgewechselt werden. Damit entsteht für den Patienten eine zusätzliche Belastung, und der Aufwand an medizinischer Betreuung und Operationskapazität wird bei dem hohen Bedarf an Herzschrittmachern sehr groß. Batterien mit längerer Lebensdauer würden hier zu einer wesentlichen Verbesserung führen.

Energie für Herzschrittmacher

Mit Radionuklidbatterien gelingt es nun, die Zeitspanne bis zum nächsten Batteriewechsel auf 12 Jahre auszudehnen. Als Radionuklid wird dabei fast ausschließlich Plutonium 238 in diesen Batterien verwendet. Bisher sind einige 1000 Radionuklidbatterien in Patienten eingesetzt worden. Sie haben sich im praktischen Einsatz gut bewährt. In welchem Umfang jedoch Radionuklidbatterien für diese Anwendung in Zukunft die chemischen Stromquellen ersetzen werden, ist u. a. von der weiteren technischen Entwicklung abhängig, denn man versucht, auch bei herkömmlichen Batterien die Betriebsdauer zu erhöhen.

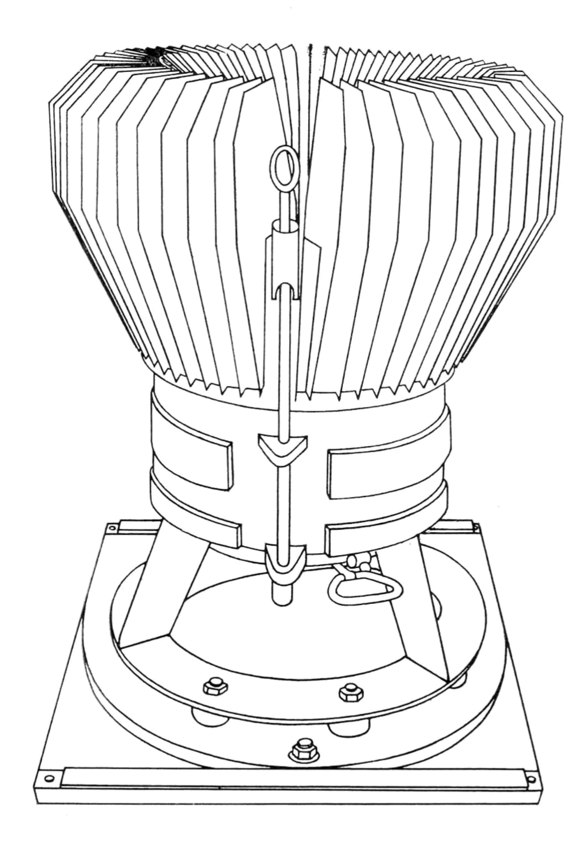
Für den Betrieb von Herzschrittmachern wird nur eine geringe elektrische Leistung benötigt. Diese Anwendung von Radionuklidbatterien gehört zu einer Gruppe von Einsatzfällen, für die ein Leistungsbereich von Mikrowatt bis Milliwatt erforderlich ist. Höhere elektrische Leistungen im Bereich von Watt bis Kilowatt sind bei einer anderen Gruppe von Anwendungen erforderlich, z. B. für den Betrieb elektronischer Geräte in Satelliten, für automatische Wetterstationen in abgelegenen Gebieten oder für die Energieversorgung von Leuchtbojen auf dem Meer.

In Bild 73 ist eine Radionuklidbatterie dargestellt, die in der Sowjetunion produziert wird. In diesem Radioisotopengenerator »Efir« wird als Strahlenquelle Strontium 90 mit einer Aktivität von $3{,}7 \cdot 10^{15}$ Bq eingesetzt. Mit dieser schon recht hohen Aktivität erreicht man eine Wärmeleistung von 650 W und durch Umsetzung von Wärme in Elektroenergie in den Thermoelementen eine elektrische Leistung von 30 W. Die Betriebsdauer dieser Batterie beträgt 100000 Stunden. Sie wird besonders für die Stromversorgung von automatischen Leuchtfeuern, für Leuchttürme und Feuerschiffe, die als Navigationshilfe für die Schiffahrt dienen, in erheblichen Stückzahlen eingesetzt.

Zuverlässig in Navigationshilfen

Geringere elektrische Leistung als der Betrieb von Leuchtfeuern erfordert im allgemeinen die Stromversorgung von Meßstationen. Dafür wurde in der Sowjetunion der Radioisotopengenerator »Beta-S« entwickelt. Als Strahlenquelle wird Strontium 90 mit einer Aktivität von $1{,}2 \cdot 10^{15}$ Bq eingesetzt, und die abgegebene elektrische Leistung beträgt etwa 10 W. Der Generator ist für eine Betriebsdauer von 100000 Stunden ausgelegt. Als Einsatzbereich wird die Energieversorgung von autonomen Meßsystemen an schwer zugänglichen Orten genannt, insbesondere werden abgelegene Wetterstationen, die Funksender zur Datenübermittlung enthalten, mit dem Generator «Beta-S» aus-

Weniger Aufwand für abgelegene Wetterstationen



73 Radioisotopengenerator »Efir« aus der UdSSR

gerüstet. Damit konnte der Wartungsaufwand für Wetterstationen im hohen Norden der Sowjetunion wesentlich verringert werden.

Von größtem Wert aber waren Radionuklidbatterien für die Entwicklung der Raumfahrttechnik. Hier entstanden neue technische Aufgaben, die vielfach nur mit Radionuklidbatterien optimal gelöst werden konnten. Für die Satellitentechnik mußten völlig neue Gerätesysteme und Bauteile entwickelt werden, und dazu zählen auch die Radionuklidbatterien, deren Eigenschaften die Leistungsdaten des gesamten Raumflugkörpers wesentlich beeinflussen.

Radionuklidbatterien im Weltraum

So hat die Entwicklung der Weltraumtechnik die Konstruktion von Radionuklidbatterien entscheidend gefördert und in der ersten Entwicklungsphase weitgehend getragen. Im Jahre 1959 wurde über ein Demonstrationsmodell aus den USA berichtet, das den Namen SNAP 3 trägt. Die Abkürzung SNAP steht für »System for Nuclear Auxiliary Power« (System für nukleare Hilfsenergie) und kennzeichnet die in den USA im Rahmen eines langjährigen Programms entwickelten Radionuklidbatterien. Diese Energiequellen sind in unterschiedlichen Ausführungsformen in vielen amerikanischen Raumflugkörpern zum Einsatz gelangt. Ein Beispiel dafür sei aus dem Apollo-Programm genannt: Während einer Mondlandung hatten die Astronauten eine automatische Meßstation auf der Mondoberfläche installiert, die als Energiequelle einen Generator SNAP 27 enthielt. Mit diesem Meßsystem sind z. B. Erschütterungen auf der Mondoberfläche nachgewiesen und zur Erde durch Funk übermittelt worden.

Wärmequelle für Lunochod 1

Die Erfolge der sowjetischen Weltraumtechnik sind durch die Entwicklung vieler spezieller Bauteile, u. a. auch durch die Bereitstellung von Radionuklidbatterien, erreicht worden. Sie dienen als Energiequellen in Erdsatelliten und in Flugkörpern, die den Mond und das Planetensystem erforschen. Dabei werden Radionuklidsysteme nicht nur als Stromgeneratoren, sondern auch als Wärmequellen eingesetzt. So war das ferngesteuerte Mondfahrzeug Lunochod 1 mit

einer Radionuklid-Wärmequelle ausgerüstet, die während der Mondnächte, in denen die Oberflächentemperatur des Mondes auf —130 °C und darunter absinkt, im Geräteteil des Fahrzeugs eine Temperatur von etwa 15 °C gewährleistete. Damit wurden Störungen an Geräten infolge extremer Temperaturschwankungen vermieden.

Künstliches Herz mit Radionukliden?

Es ist denkbar, daß in Zukunft besonders der Einsatz von Wärmequellen auf Radionuklidbasis zu neuen technischen Lösungen führt. So wird in einem langjährigen Arbeitsprogramm ein künstliches Herz entwickelt, bei dem der Antrieb der Pumpe durch eine Plutoniumquelle von 25 W Wärmeleistung erfolgt. Die Plutonium-238-Quelle ist unter Berücksichtigung aller denkbaren Unfälle sicher gekapselt. Ihr Einsatz hängt aber auch von dem Ergebnis der parallel betriebenen Entwicklung anderer konventioneller Energiequellen ab.

7 Anwendung im Forschungsbereich

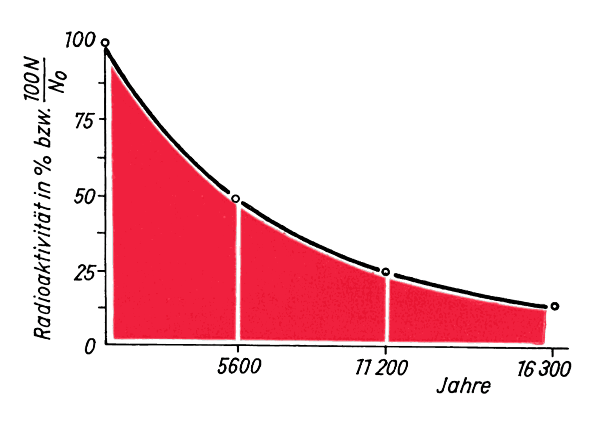
Zeitmessung mit Radionukliden

Forschungsergebnisse auf irgendeinem Gebiet der Wissenschaft führen oft zu völlig unerwarteten Fortschritten in anderen Wissenschaftszweigen. Scheinbar isolierte Forschungsgebiete sind auf diese Weise vielfach miteinander verzahnt.

So war bei der Entdeckung der Radioaktivität zunächst sicher kaum daran zu denken, daß wenige Jahrzehnte später diese beim Zerfall von Atomkernen auftretende Strahlung einmal zur Zeitbestimmung bei archäologischen Funden oder zur Ermittlung des Alters von Gesteinsschichten benutzt werden könnte. Heute, nachdem diese neuartigen Meßverfahren technisch ausgereift sind und sich bei einer Vielzahl von Einzelmessungen bewährt haben, wissen wir, daß damit ein entscheidender Fortschritt bei der Präzisierung der historischen und erdgeschichtlichen Zeitskala erzielt worden ist.

Grundlage: Zerfallsgesetz

Zunächst wollen wir uns den physikalischen Grundlagen dieses interessanten Meßverfahrens zuwenden. Das Verfahren stützt sich auf zwei Tatsachen: Erstens befinden sich überall in der uns umgebenden materiellen Welt auf natürliche Weise entstandene, also nicht mit »Maschinen« erzeugte Radionuklide, und zum zweiten ist der Zerfall dieser natürlichen Radionuklide durch das Zerfallsgesetz $N = N_0 e^{-\lambda t}$ mit der Zeit verknüpft (Bild 74).



74 Der radioaktive Zerfall nach dem Zerfallsgesetz $N = N_0 e^{-\lambda t}$ am Beispiel des C 14

Wenn man von einer bestimmten Substanz weiß, wieviel radioaktive Atomkerne N_0 bei der Bildung dieser Substanz vorhanden waren, und man stellt zusätzlich heute durch eine Messung fest, wieviel Atomkerne N jetzt noch in dieser Substanz enthalten sind, so läßt sich aus dem Zerfallsgesetz nach Einsetzen der bekannten Zerfallskonstante λ unmittelbar die Zeit t berechnen, die seit der Bildung der zu untersuchenden Substanz vergangen ist. Dieses relativ übersichtliche Verfahren wird bei der Altersbestimmung mit radioaktivem Kohlenstoff C 14 angewandt.

Altersbestimmung nach der C-14-Methode

In allen Lebewesen ist C 14

Sämtliche Pflanzen und Tiere enthalten als ein Grundelement den Kohlenstoff. Weitere wichtige Elemente in organischen Substanzen sind Wasserstoff, Stickstoff und Sauerstoff.
Vom Kohlenstoff existieren mehrere Isotope, und wenn man aus organischem Material reinen Kohlenstoff gewinnt, so setzt sich dieser immer aus den verschiedenen Kohlenstoffisotopen in einem bestimmten Mischungsverhältnis zusammen.
Eines dieser Kohlenstoffisotope ist das radioaktive C 14, das mit einer Halbwertzeit von 5600 Jahren zerfällt. Für das Meßprinzip ist nun entscheidend, daß lebende Pflanzen und Tiere ständig direkt oder indirekt auch radioaktiven Kohlenstoff über das CO_2 aus der Atmosphäre aufnehmen. Dieser Kontakt mit dem atmosphärischen CO_2 wird aber beim Absterben der Pflanze oder des Tieres unterbrochen, und von diesem Zeitpunkt an verringert sich ständig der C-14-Gehalt entsprechend dem Zerfallsgesetz in dem toten Organismus.

Radioaktivität verrät das Alter

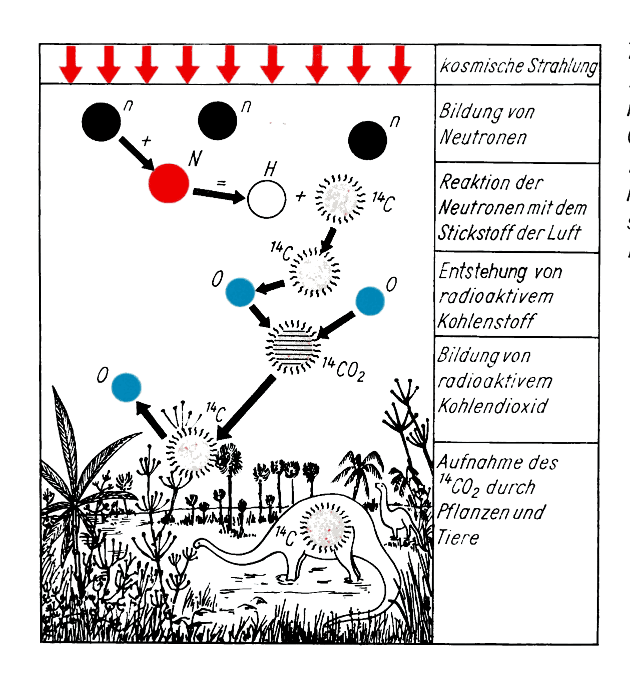
Wenn also z. B. ein Baumstamm vor 5600 Jahren abgestorben ist und zu diesem Zeitpunkt N_0-Kohlenstoffatome mit C-14-Kernen enthalten hat, so wäre davon inzwischen die Hälfte zerfallen, und wir würden nur noch die verbliebene Hälfte, also $N_0/2$, messen. Und aus diesem Meßwert könnten wir schließen, daß der Baumstamm vor 5600 Jahren abgestorben ist – allerdings müssen wir dabei die Anfangskonzentration N_0 kennen.
Tatsächlich ist uns diese Zahl N_0 durch bestimmte Vorgänge in der Erdatmosphäre bekannt, die schematisch in Bild 75 dargestellt sind. Durch die kosmische Strahlung, die ständig in die Erdatmosphäre einfällt und in Bild 75 durch Pfeile angedeutet ist, werden in den oberen Schichten der Atmosphäre ununterbrochen Neutronen erzeugt. Diese Neutronen reagieren mit dem in der Luft vorhandenen Stickstoff hauptsächlich entsprechend der Reaktionsgleichung

Wie entsteht C 14?

Neutron + Stickstoffkern = Wasserstoffkern + C-14-Kern.
Die so entstandenen C-14-Kerne zerfallen wieder, und durch die beiden ständig ablaufenden Prozesse, Neubildung und Zerfall von C14, hat sich ein Gleichgewicht für die C-14-Konzentration auf der Erde eingestellt: Über jedem Quadratzentimeter der Erdoberfläche befinden sich etwa 2,4 C-14-Kerne. Man schätzt die Gesamtmenge an C 14 auf der Erde einschließlich Atmosphäre auf 80000 kg.
Die C-14-Atome in der Atmosphäre verbinden sich – ebenso wie die Kohlenstoffatome, deren Kerne stabil sind – mit dem Sauerstoff in der Luft zu Kohlendioxid, und damit ist der CO_2-Gehalt der Luft mit einem radioaktiven Anteil markiert. Das gasförmige Kohlendioxid wird von den Pflanzen aufgenommen, und dadurch gelangt auch ein winziger radioaktiver Anteil in die Pflanzen – sie werden, in allerdings äußerst geringem und für die Gesundheit völlig unschädlichem Maße, radioaktiv.

Wieviel C 14 ist in Lebewesen?

Die Tiere ernähren sich von den Pflanzen, und so finden wir einen verschwindend geringen, aber auf der gesamten Erde im wesentlichen konstanten Anteil an C 14 auch in jedem tierischen Organismus. Die spezifische Aktivität von



75 Grundlage der Altersbestimmung nach der C-14-Methode: Die Bildung von radioaktivem C 14 und seine Aufnahme durch Pflanzen und Tiere

Kohlenstoff, der aus noch nicht gealterten biologischen Proben gewonnen worden ist, beträgt etwa 15 Kernzerfälle je Minute und Gramm Kohlenstoff. Diese Zahl ist das Ergebnis umfangreicher Meßreihen. Es wurden dabei Proben aus den verschiedensten Erdregionen untersucht, denn die genaue Ermittlung dieser normalen C-14-Konzentration ist für die Altersbestimmung entscheidend. Sie entspricht dem Wert N_0 im Zerfallsgesetz, und wenn wir N_0 als Zahl in diese Gleichung einsetzen, muß für die Berechnung des Probenalters t nur noch die Restaktivität der Probe gemessen werden.

C-14-Messung erfordert Aufwand

Diese Messung erfordert allerdings eine speziell konstruierte Anordnung und größte Sorgfalt bei der Aufbereitung der Proben. Es sind energiearme Betateilchen, die bereits Zeitungspapier nicht mehr durchdringen können, mit maximal erreichbarer Empfindlichkeit zu messen.

Anfangs hatte man dieses Meßproblem folgendermaßen gelöst: Der Kohlenstoff, der aus der Probe gewonnen worden war, wurde als Katode auf die Innenfläche einer Zählrohrwand aufgetragen. So gelangen die vom C 14 emittierten Betateilchen direkt in das strahlenempfindliche Zählrohrvolumen und werden mit hoher Empfindlichkeit registriert.

Heute benutzt man eine verbesserte Meßanordnung: Der aus der Probe gewonnene Kohlenstoff wird in einer gasförmigen Verbindung direkt mit der Gasfüllung in das Zählrohr eingeführt. Damit gelingt es, die Meßempfindlichkeit weiter zu erhöhen.

Bei diesen Messungen äußerst geringer Aktivitäten sind Maßnahmen zur Abschirmung der Höhenstrahlung erforderlich. Deshalb befindet sich die Meßanordnung insgesamt in einer Metallabschirmung, zusätzlich wird das Meßzählrohr mit einer Anzahl anderer Zählrohre »kranzförmig« umgeben. Dieser »Zählrohrkranz« erfüllt folgende Aufgabe: Wenn sowohl im Zählrohrkranz als auch im Meßzählrohr gleichzeitig ein Impuls auftritt, so muß die impulsauslösende Strahlung von außen in die Meßanordnung eingedrungen sein, und solche Impulse sind aus dem Meßergebnis auszusortieren.

Meßbereich Probenaufbereitung

Bedingt durch die Halbwertzeit des C 14 von 5600 Jahren kann man mit der beschriebenen Meßmethode Proben untersuchen, deren Alter etwa zwischen 1000 und 50000 Jahren liegt. Der Fehler für die Altersbestimmung beträgt dabei

im allgemeinen etwa 10%, bei einem Probenalter von 5000 Jahren also etwa ±500 Jahre, wobei in günstigen Fällen auch genauere Ergebnisse erzielt werden können.
Ein gewisser Nachteil des Verfahrens besteht darin, daß die Meßprobe zerstört werden muß – aus ihr wird reiner Kohlenstoff gewonnen. Als Richtwert kann man annehmen, daß für die Gasmeßmethode etwa 10 Gramm elementarer Kohlenstoff erforderlich sind.
Die Altersbestimmung nach der C-14-Methode ist heute ein durch sorgfältige Testmessungen gesichertes Verfahren; es wurde auch in der DDR häufig angewandt. Zur Illustration sei dafür ein Beispiel angeführt.

Das Alter von Swantewit

Auf der Fischerinsel im Tollensesee bei Neubrandenburg war 1969 u. a. eine alte Holzfigur ausgegraben worden. Diese Doppelfigur stellte bei den Slawen den Burg- und Fruchtbarkeitsgott Swantewit (Bild 76) dar. Aus dem Fund konnten wichtige Informationen über die Besiedlung der Fischerinsel vor etwa 1000 Jahren erhalten werden. Auf der Insel befand sich eine Fluchtburg, die etwa im 12. Jahrhundert zerstört worden war. Für die Altersbestimmung nach der C-14-Methode, die im Zentralinstitut für alte Geschichte und Archäologie der Akademie der Wissenschaften der DDR durchgeführt wurde, untersuchte man 4 Holzproben. Die Meßergebnisse lagen zwischen den Jahren 990 und 1267 unserer Zeitrechnung, und sie ermöglichten eine altersmäßige Einordnung der doppelköpfigen Holzplastik im Rahmen dieser Messungen.
Die C-14-Methode hat der amerikanische Chemiker *Willard F. Libby* gefunden. Ihm wurde dafür 1960 der Nobelpreis zuerkannt. In einer von ihm veröffentlichten Liste sind über 200 C-14-Altersbestimmungen enthalten. So ist Holz aus



76 Doppelköpfige Holzplastik, deren Alter durch C-14-Messungen an Holzproben aus der Fundstelle ermittelt wurde

alten ägyptischen Gräbern untersucht worden, es wurde das Alter von Schriftrollen, die in einer Höhle am Toten Meer gefunden worden sind, bestimmt, und für frühgeschichtliche Siedlungen konnten durch Untersuchung von Holzkohleresten an Feuerstellen Altersbestimmungen durchgeführt werden.

Wie alt sind Steine?

Die Gesteine auf unserer Erdoberfläche sind aus der flüssigen Phase der Erdmaterie oder durch Ablagerungen während eines langen Zeitraums von vielen hundert Millionen Jahren entstanden. Während das Alter der Erde mit 4500 bis 5000 Millionen Jahren angegeben wird, datiert man die ältesten Gesteine auf 3000 Millionen Jahre.
Wir wollen nun der Frage nachgehen, ob man, ähnlich wie bei der C-14-Methode, die Strahlung der noch im Gestein vorhandenen natürlichen Radionuklide für eine Altersbestimmung nutzen kann.

Strahlung aus Steinen

Von den ursprünglich in den Gesteinen vorhandenen Radionukliden sind die kurzlebigen längst abgeklungen. In der Natur finden wir noch Radionuklide mit extrem langer Halbwertzeit. Für diese Altersbestimmung werden hauptsächlich die Ausgangselemente und Endprodukte von Zerfallsreihen benutzt. Die dabei wichtigsten Daten sind nachfolgend tabellarisch zusammengestellt. Darüber hinaus hat man auch Kalium 40 und Rubidium 87 zur Altersbestimmung eingesetzt.

Ausgangsnuklid	Strahlungsart	Endprodukt	Halbwertzeit in Jahren
Uran 238	α, β	Blei 206	$4{,}51 \cdot 10^{9}$
Uran 235	α, β	Blei 207	$7{,}13 \cdot 10^{8}$
Thorium 232	α, β	Blei 208	$1{,}39 \cdot 10^{10}$

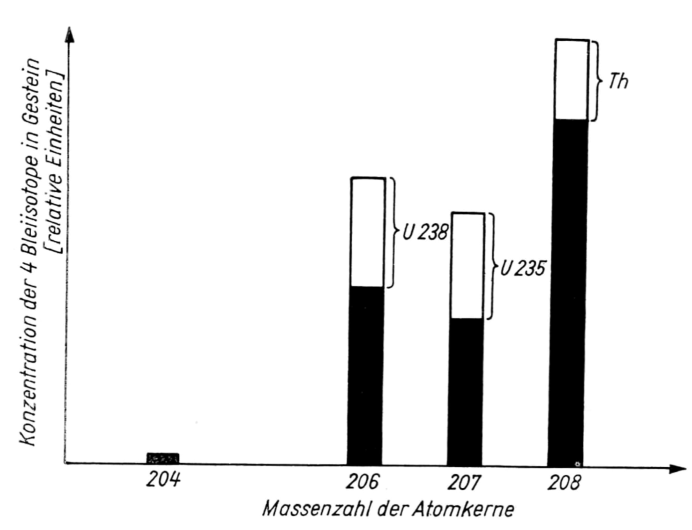
Bei diesen Zerfallsreihen kann man das einfache Zerfallsgesetz anwenden, da die Halbwertzeiten aller Zwischenprodukte klein gegenüber den Halbwertzeiten der Ausgangsnuklide sind.
Die Bestimmung des Alters von Gesteinen beruht wie die C-14-Methode darauf, daß die im Stein gemessene Radioaktivität durch das Zerfallsgesetz mit der vergangenen Zeit in Verbindung gebracht werden kann. Jetzt entsteht aber ein Problem. Während die beim Eintritt des Todes in Organismen vorhandene C-14-Konzentration bekannt ist, kennt man den entsprechenden Wert bei Steinen nicht. Die Anfangskonzentration radioaktiver Substanzen ist für verschiedenes Gestein unterschiedlich. Sie muß zusätzlich durch eine weitere Messung am Untersuchungsobjekt bestimmt werden.

Ermittlung der Anfangsaktivität

Dabei benutzt man, daß durch den Zerfall der Ausgangsnuklide Uran 238, Uran 235 und Thorium 232 die stabilen Endprodukte Blei 206, Blei 207 und Blei 208 entstehen. Die Konzentration dieser Bleiisotope kann man nun ebenfalls am Untersuchungsobjekt feststellen. Das erfolgt mit Massenspektrometern, deren Arbeitsweise aber hier nicht erläutert werden kann.

Konzentration der Bleiisotope

Allerdings muß der mit dem Massenspektrometer erhaltene Meßwert zusätzlich korrigiert werden. Das wollen wir mit Hilfe von Bild 77 erläutern. Im allgemeinen enthält Gestein auch Blei, das nicht durch radioaktiven Zerfall entstanden ist. Bei diesem Bleianteil, der bereits bei der Gesteinsbildung vorhanden war, stehen aber die Konzentrationen der vier Bleiisotope in einem bestimmten Verhältnis zueinander. Das zeigen die schwarzen Balkenteile in Bild 77. Die weißen Balkenteile dagegen kennzeichnen den Anteil, der durch



77 Konzentrationsverteilung für die 4 Bleiisotope in altem Gestein. Neben den drei Klammern sind die Ausgangsnuklide der Zerfallsreihen angegeben, die zu den betreffenden Bleiisotopen führen

radioaktiven Zerfall entstanden sein muß. Mit dem Massenspektrometer erhält man Isotopenkonzentrationen, die dem gesamten Balken in Bild 77 entsprechen. Davon sind die schwarzen Balkenteile abzuziehen, die man durch Rechnung, z. B. unter Berücksichtigung des stabilen Isotops Pb 204, erhält. So hat man die Konzentration des Endprodukts, das durch radioaktiven Zerfall entstanden ist. Nun können wir im Zerfallsgesetz für die Anfangskonzentration N_0 einen Zahlenwert einsetzen, denn sie setzt sich aus der Restaktivität und dem stabilen Endprodukt zusammen. Das ist leicht zu verstehen: Entweder ein Atomkern der Ausgangsnuklide ist noch vorhanden, dann wird er über die Aktivitätsmessung erfaßt, oder er ist in das stabile Endprodukt übergegangen, dann findet man ihn im Meßwert des Massenspektrometers wieder. Damit können wir im Zerfallsgesetz für alle Größen außer der Zeit Zahlenwerte einsetzen und daraus die seit der Gesteinsbildung vergangene Zeit t berechnen.

Durch Doppelmessung sicherer

Da die beiden Uranisotope U 238 und U 235 immer gemeinsam im Gestein auftreten, läßt sich die Altersbestimmung sowohl mit U 238 als auch mit U 235 einzeln durchführen. Man erhält dann zwei unabhängig ermittelte Werte für das Gesteinsalter, und wenn diese beiden Werte im Rahmen der Meßgenauigkeit übereinstimmen, so hat man das Gesteinsalter mit hoher Sicherheit bestimmt.

Geologische Zeitskala wurde präzisiert

Mit dieser Methode sind grundlegende Erfolge erzielt worden. Durch eine Vielzahl von Einzelmessungen ist es gelungen, die geologische Zeitskala wesentlich zu präzisieren. Vorher hatte man die Zeitskala auf der Grundlage von biologischen Überresten, deren Spuren man in den verschiedenen geologischen Schichten fand, festgelegt. Mit dieser paläontologischen Zeitskala läßt sich feststellen, welche Gesteinsschicht jünger oder älter ist, aber diese Zeitskala bleibt auf solche relativen Angaben beschränkt, Absolutwerte für das Alter konnten erst mit Methoden, denen das Zerfallsgesetz für Radionuklide zugrunde liegt, erhalten werden. Auch erfaßt die paläontologische Zeitskala nicht die Erdfrühzeit, sondern nur etwa die letzten 500 Millionen Jahre, weil erst seit dieser Zeit Spuren biologischer Substanzen auf der Erde auftreten.

Die ältesten untersuchten Steine

Für Messungen nach dem radioaktiven Zerfallsgesetz existieren diese Grenzen jedoch nicht, für die ältesten Gesteine auf der Erde ist ein Alter von etwa 3000 Millionen Jahren bestimmt worden, und an einigen Meteoriten ergaben die Messungen ein Alter bis zu 4800 Millionen Jahren.



Die Kettenreaktion im Kernreaktor

Der erste Kernreaktor

Nach der überraschenden Entdeckung der Kernspaltung und dem Nachweis dabei zusätzlich freiwerdender Neutronen beschäftigten sich ab 1938 zahlreiche Physiker der führenden Forschungszentren in Frankreich, der Sowjetunion, den Niederlanden, Deutschland, Großbritannien und den USA mit der Theorie der atomaren Kettenreaktion.

Furcht vor Mißbrauch

Die politische Lage in Europa warf jedoch durch die aggressive Haltung des faschistischen Deutschland auch auf diese Entwicklung ihren Schatten. Im Spätsommer 1939 richtete deshalb *Albert Einstein* ein eindringliches Schreiben an den Präsidenten der USA *Roosevelt*, das mit folgenden Worten eingeleitet wird: »Eine neue Arbeit von *Enrico Fermi* und *Leo Szilard*, die mir im Manuskript vorgelegt wurde, veranlaßt mich zu der Annahme, daß das Element Uran in naher Zukunft zu einer neuen, wichtigen Energiequelle gemacht werden könnte. Gewisse Aspekte der dadurch geschaffenen Situation scheinen Wachsamkeit und nötigenfalls rasches Handeln seitens der Regierung zu erfordern.«

Der Brief war kurz vor Ausbruch des zweiten Weltkrieges abgefaßt worden und drückte die Besorgnis vieler Physiker aus, daß durch die letzten Entdeckungen dem faschistischen Deutschland eine schreckliche Waffe in die Hand gegeben werden könnte. Auch in Großbritannien teilten die aus Hitlerdeutschland geflüchteten Wissenschaftler diese Befürchtungen und warnten die Regierung vor einer möglichen deutschen Atombombe. Hier handelte man sofort, um dieser Gefahr zu begegnen. *Frisch* und *Peierls* entwickelten das Prinzip einer Kernspaltungsbombe und berechneten für reines Uran 235 die kritische Masse zu etwa 5 kg. Verglichen mit den Anstrengungen, die in Großbritannien u. a. auch durch James *Chadwick* unternommen wurden, war die Haltung der USA-Regierung abwartend. Im veränderten weltpolitischen Kräfteverhältnis von 1941/42 bekam die Möglichkeit einer Kernspaltungsbombe jedoch eine völlig neue Bedeutung. Nachdem am 7. Dezember 1941 japanische Unter-

USA beschleunigt Bau der Bombe

seeboote und Flugzeuge die in Pearl Harbor stationierte USA-Pazifikflotte überfallen hatten und damit der Kriegseintritt der USA ausgelöst war, änderte die USA-Regierung ihre Meinung in dieser Frage. Es wurde beschlossen, das Bombenprojekt vorrangig zu betreiben.

Bis Ende 1941 war die Kernforschung zwar in großen wissenschaftlichen

Laboratorien der Columbia University in New York, an der California University Berkeley, im Carnegie-Institut von Washington und in Princeton betrieben worden, doch stand zu dieser Zeit auch in den USA das Uran noch nicht in ausreichenden Mengen zur Verfügung.

Anfang 1942 übersiedelten die Reaktorphysiker zur Universität in Chikago. Die Leitung übernahm *Arthur Compton*. Neben anderen bekannten Forschern war *Enrico Fermi* dort tätig (Bild 78).

Fermi, bekannt als hervorragender Experimentator und Theoretiker, war bereits mit 25 Jahren Professor der theoretischen Physik an der Universität Rom geworden. Nach dem Empfang des Nobelpreises für die Ergebnisse seiner Kernumwandlungen mit abgebremsten Neutronen war er 1938 von Stockholm nicht in das faschistische Italien zurückgekehrt. Als neue Heimat wählte er die USA. In Chikago war er bald eine führende Kraft der Gruppe, die sich mit Kernreaktorforschung befaßte und später den Tarnnamen »Metallurgisches Labor« trug.

1942 wurden alle Arbeiten unter Militärkontrolle gestellt. Die Kräfte wurden jetzt ausschließlich auf das Bombenprojekt konzentriert.

Kernreaktor wird gebaut

Dadurch standen nach relativ kurzer Zeit erstmals mehrere Tonnen hochreinen Uranmetalls und Graphits zur Verfügung. Auch wenn die Bombe das Ziel aller Bemühungen war, mußten zunächst Erfahrungen mit Kernreaktoren über den Ablauf der Kettenreaktion gesammelt werden. Der Aufbau eines neuen, vergrößerten Versuchsmeilers wurde in einer Tennishalle unter der Westtribüne des Universitätsstadions, dem Stagg Field, unter Leitung von *Fermi* in Angriff genommen.

Die Physiker setzten Uran- und Graphitwürfel sorgfältig zusammen und legten in wochenlanger mühevoller Arbeit Schicht für Schicht übereinander. Dabei wurde ständig die Neutronendichte in der Anordnung überwacht, um eine möglichst wirkungsvolle Kontrolle über die Vermehrung der Neutronen zu haben. Um nicht ständig auf die Instrumente starren zu müssen, ist es üblich, die Neutronensignale nach elektronischer Verstärkung mit Hilfe eines Lautsprechers hörbar zu machen. So kann man die Intensität der Neutronen gut verfolgen.

Es war insgesamt schon die gewaltige Menge von über $5^1/_2$ Tonnen Uran-



78 Enrico Fermi

metall, fast 37 Tonnen Uranoxid und 35 Tonnen reines Graphit aufgebaut, als mit jedem Baustein die Lautsprecher deutlich schneller tickten. Das war das Zeichen für das stufenweise Ansteigen der Neutronenvermehrung.
Zur Feinregulierung der Neutronenmultiplikation hatten die Forscher bewegliche Stäbe aus Kadmium und Borstahl eingebaut, welche die Eigenschaft haben, Neutronen einfangen zu können. Den sogenannten kritischen Zustand, in dem sich die Kettenreaktion gerade im Gleichgewicht befindet, erreichte man zuletzt durch ganz vorsichtiges Herausziehen der Kadmiumstäbe.

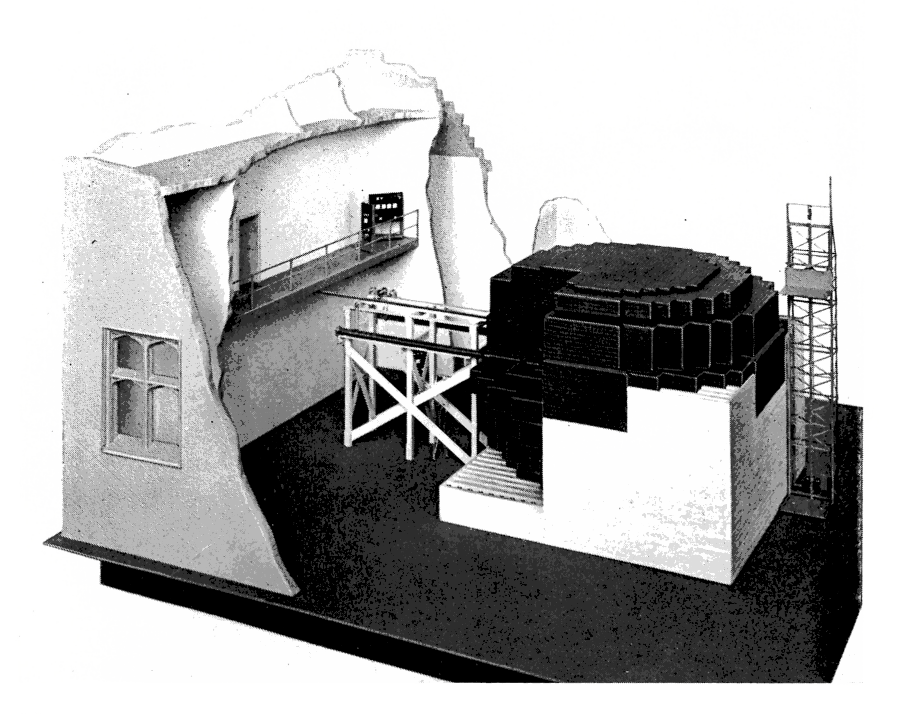
Erster Kernreaktor arbeitet

Das geschah am 2. Dezember 1942. Die Anlage lief zwar zuerst nur mit einer Wärmeleistung von einem halben Watt, doch war damit praktisch nachgewiesen, daß die Kernenergie in großem Maßstab nutzbar gemacht werden kann (Bild 79).
Das geschilderte Experiment war der Anfang der weltweiten Entwicklung zur friedlichen Nutzung der Kernenergie, doch dürfen wir dabei nicht vergessen, daß alle Untersuchungen nicht in erster Linie der Entwicklung des Kernreaktors, sondern der Kernwaffe dienten. An das historische Ereignis erinnert heute eine Bronzetafel an der Laboratoriumshalle der Universität in Chikago, die folgende Inschrift trägt:

ON DECEMBER 2, 1942 MAN ACHIEVED
HERE THE FIRST SELF-SUSTAINING
CHAIN REACTION AND THEREBY
INITIATED THE CONTROLLED
RELEASE OF NUCLEAR ENERGY.

Am 2. Dezember 1942 vollbrachte der Mensch hier die erste sich selbst erhaltende Kettenreaktion und leitete dadurch die gesteuerte Freisetzung von Kernenergie ein.

79 Modell des ersten Kernreaktors der Welt (Chikago-Pile von E. Fermi, 1942)



Obwohl wir durch die moderne Technik heute an Überraschungen gewöhnt sind, stutzt man doch bei den Angaben über die große Menge an Uran und Graphit, die in Chikago für die erste kritische Anordnung verbraucht wurde.
Es hatte sich aber herausgestellt, daß die Verhältnisse beim Uran komplizierter sind, als sie *Flügge* unmittelbar nach den ersten Ergebnissen in einem im August 1939 erschienenen Artikel dargestellt hatte, der damals in aller Welt beträchtliches Aufsehen erregte.

Artikel schafft Unruhe

»Als um die Jahreswende auf Grund der chemischen Ergebnisse von Prof. *Hahn* die Aufspaltung des Urankerns Gewißheit wurde, stellten wir uns sofort die Frage: Wenn nun bei der Spaltung durch ein auftreffendes Neutron einige Neutronen freigemacht werden, was geschieht dann weiterhin mit diesen Neutronen? Sie haben doch Gelegenheit, andere Urankerne zu spalten; dabei wird wieder jenes Neutron neue Neutronen erzeugen und so fort, solange noch Uran vorhanden ist, das zertrümmert werden kann. Es muß also eine rasch anschwellende Lawine von Neutronen das ganze verfügbare Uran zertrümmern. Es liegt genau das vor, was man in der Chemie eine Kettenreaktion nennt. Damit ist das erreicht, was bisher nie gelungen war: Mit einem einzigen Neutron, das ‚zündet', wird eine wägbare, ja beliebig große Menge von Uran umgesetzt und dabei Kernenergie freigemacht.«
Inwieweit diese hochgesteckten Erwartungen zu erfüllen sind, wollen wir genauer untersuchen.
Eines war jedoch durch die Erfahrungen vieler Jahre von vornherein klar.
»Auch eine beliebig große Menge natürliches Uran gibt ohne besondere Zusätze und besondere Anordnungen weder eine Explosion noch eine die Energie der Spaltprozesse ausnützende kontinuierlich arbeitende Maschine.«

Neutronenlawine unter Kontrolle

Welche Bedingungen müssen erfüllt sein, damit ein Kernreaktor funktioniert?
Der grundlegende physikalische Prozeß in Kernreaktoren ist die Kettenreaktion der Spaltung von Urankernen. Diese Reaktion wird durch Neutronen ausgelöst und weitergetragen. Daher befinden sich in Reaktoren eine Vielzahl von Neutronen. Im kritischen Zustand dieser Systeme, womit der normale Betriebszustand gemeint ist, werden in der Zeiteinheit die gleiche Anzahl von Neutronen durch Spaltungsprozesse erzeugt wie durch Einfang mit und ohne nachfolgende Spaltung sowie durch Herausfliegen aus dem Reaktor verlorengehen. Der springende Punkt ist nun dabei, die Verhältnisse so einzurichten, daß dieses Gleichgewicht erreicht und über längere Zeit gehalten werden kann. Das ist jedoch nicht ohne weiteres möglich.
Zunächst muß das gewonnene Uranerz von Beimengungen gereinigt werden, die in starkem Maße Neutronen einfangen. Dazu sind neue Verfahren entwickelt worden, weil ein bisher nicht erreichter Reinheitsgrad erforderlich ist.

Zusammensetzung des Urans

Doch das sind nicht die einzigen Schwierigkeiten. Das in der Natur vorkommende Element Uran besteht im wesentlichen aus zwei Isotopen verschiedener Masse: zu über 99% aus dem Isotop mit der Masse 238 und nur zu 0,7% aus dem Isotop der Masse 235, das hauptsächlich für die Spaltungsvorgänge in Frage kommt.
Der Kern des Urans 238 enthält bei gleicher Kernladung drei Neutronen mehr als der des Urans 235. Obwohl diese »Überzahl« im Verhältnis zur Gesamtzahl der Neutronen (143 bzw. 140) gering ist, werden die abstoßenden Kräfte der Protonen besser neutralisiert, und die Kernbausteine sind insgesamt fester aneinander gebunden.

Eigenschaften der Uranisotope

Um eine Spaltung des Urans 238 zu bewirken, müssen deshalb die Neutronen mit einer Geschwindigkeit von mindestens 15000 km/s in den Kern eindringen. Von fünf derartig schnellen Neutronen spaltet aber auch nur eines den Kern, die anderen werden entweder ohne Spaltung ein-

gefangen oder am Kern unelastisch gestreut, wobei ihre Geschwindigkeit stark vermindert wird. Aus diesem Grunde ist ein Gleichgewicht ausschließlich mit schnellen Neutronen bei alleiniger Spaltung des Urans 238 nicht zu erreichen.
Im Unterschied dazu läßt sich Uran 235 von Neutronen beliebig niedriger Energie spalten. Die Wahrscheinlichkeit für die Spaltung steigt sogar mit verringerter Neutronenenergie infolge der größeren Wechselwirkung bei »langsamen« Geschwindigkeiten an. Das kann aber nicht ohne weiteres zur Verbesserung des Neutronenhaushalts genutzt werden, denn – wie schon erwähnt – liegt der Uran-235-Gehalt des natürlichen Urans noch unter 1%. Außerdem wird die Sache dadurch kompliziert, daß die bei der Spaltung erzeugten Neutronen eine Geschwindigkeit von etwa 20000 km/s aufweisen. Zur Fortsetzung der Kettenreaktion durch Spaltung des Urans 235 müssen sie aber auf Geschwindigkeiten von etwa 2 km/s abgebremst werden. Um dies ohne größere Verluste zu erreichen, griff man zu einer List.

Was ist ein Moderator?

Das Uran 238 mußte daran gehindert werden, die schnellen Spaltneutronen durch Anlagerung abzufangen, bevor sie das Uran 235 spalten können. Deshalb mischte man dem Uran größere Mengen von Substanzen bei, welche die Eigenschaft haben, die Neutronen bei Zusammenstößen zu verlangsamen, nicht aber einzufangen und so dem Prozeß zu entziehen. Für einige mittlere Geschwindigkeiten der Neutronen ist außerdem noch die Wahrscheinlichkeit für die Anlagerung an Uran 238 besonders groß (Resonanzprozeß). Daher muß das Bremsmittel mit möglichst wenigen Stößen die Geschwindigkeit der Neutronen unter die kritischen Resonanzwerte herabsetzen.
Als derartiges Bremsmittel, auch Moderator genannt, sind Elemente mit niedriger relativer Atommasse erforderlich, denn die Mechanik lehrt, daß Zusammenstöße einen um so größeren Energieverlust bewirken, je ähnlicher die Massen des stoßenden und des gestoßenen Teilchens einander sind. Das kann man selbst leicht durch Experimente mit gleichgroßen Körpern, etwa mit Billardbällen, bestätigen. Die Bremsung der Neutronen auf diese Weise wurde schon 1935 in Rom durch *Fermi* und seine Forschungsgruppe genutzt, der unter anderen *Amaldi, Pontecorvo, Rasetti* und *Segré* angehörten. Als Bremsmittel sind »schweres Wasser«, das ist Wasser mit dem Wasserstoffisotop der Masse 2, und hochgereinigter Graphit geeignet.

Effektive Bremsung

In der Praxis sieht eine für diese Zwecke eingerichtete Anlage etwa so aus, daß Schichten aus Uran abwechselnd mit Schichten des Moderators angeordnet sind. Die im Uran erzeugten Spaltneutronen treten zum großen Teil in die benachbarten Bremsschichten ein, werden verlangsamt und kommen mit einer Geschwindigkeit in das Uran zurück, bei der sie vorwiegend das Uran 235 spalten und kaum noch vom Uran 238 eingefangen werden.
Das Verhältnis Uran zu Moderatormaterial muß gut abgestimmt sein. Wenn nämlich zuwenig Moderator verwendet wird, werden die Neutronen nicht hinreichend gebremst, und wenn zuviel Moderator vorhanden ist, werden zu viele Neutronen durch den Moderator eingefangen. Es ist üblich, den Reaktortyp, bei dem die Kettenreaktion vor allem durch abgebremste, sogenannte thermische Neutronen, aufrechterhalten wird, als thermischen Reaktor zu bezeichnen. Mit diesen Systemen wollen wir uns zuerst beschäftigen.
Dem »schnellen Reaktor«, bei dem die Kettenreaktion durch Neutronen mit hoher Geschwindigkeit abläuft, ist ein besonderer Abschnitt gewidmet.

Kritische Größe

Die Anlage muß selbstverständlich so groß sein, daß die nach außen wegfliegenden Neutronen die Bilanz nicht zu sehr negativ belasten. Die Verhältnisse werden günstiger, je größer die Anordnung wird. Bei einer bestimmten Größe wird die Neutronenbilanz ausgeglichen, es werden dann genau so viele Neutronen durch Spaltung erzeugt wie insgesamt durch Verluste und die Auslösung neuer Spaltungen verbraucht werden. Die entsprechenden Abmessungen nennt man die kritische Größe des Reaktors und die im System enthaltene Menge an Spaltstoff die kritische Masse.

Woher kommt die Kernenergie?

Hat ein Kernreaktor seine kritische Größe erreicht, dann werden im Verlauf der Kettenreaktion durch die Neutronen in gleichen Zeiten gleichbleibende Mengen von Urankernen gespalten und die Spaltbruchstücke mit enormer Wucht auseinandergeschleudert. Die dem Ort der Spaltung nächstgelegenen Schichten im Uran oder im Moderator bremsen durch Stoß die Bruchstücke ab und erwärmen sich dabei, denn Wärme ist nichts anderes als die Energie sich bewegender Atome oder Moleküle. Dieser Energiebetrag ist ein überzeugender Beweis für die Gültigkeit der Einsteinschen Formel, mit deren Hilfe die Größe der bei der Kernspaltung freiwerdenden Energie berechnet werden kann.

Masse wird zu Energie

Einstein zufolge entsteht die Energie durch Umwandlung der Massendifferenz zwischen dem gespaltenen Kern und den Spaltprodukten. Das darf man sich aber nicht so vorstellen, als ob bei der Spaltung ein Teilchen überhaupt verschwindet und sich in Energie auflöst. Die Zahl der Kernbausteine insgesamt ändert sich dabei nicht. Bei energiefreisetzenden Reaktionen werden nur im Durchschnitt die Nukleonen etwas leichter. Je nach der Festigkeit ihrer Bindung im Kern unterscheidet sich ihre Masse in geringem Maße.
Wie ist das zu verstehen? Es hat sich gezeigt, daß die Nukleonen in den Spaltprodukten, also in den mittelschweren Kernen fester aneinandergebunden sind als im Uran. Es muß also mehr Energie aufgewandt werden, um ein Nukleon aus einem Spaltproduktkern herauszulösen, als aus einem Urankern. Die Nukleonen sind gewissermaßen durch die Spaltung »tiefer« gesunken und haben dabei Energie abgegeben. Die Bindungsenergie beim Uran ist um etwa 0,9 MeV je Nukleon kleiner als bei den mittelschweren Elementen. Bei der Spaltung eines Urankerns in zwei mittelschwere Kerne bedeutet das für 235 Nukleonen einen Energiegewinn in der Größenordnung von 200 MeV. Um diesen Wert zu veranschaulichen, wollen wir ihn in die bekanntere Energieeinheit Kilowattstunde (kWh) umrechnen.

Energiebilanzen

Der Energiegewinn einer Spaltung in der Größe von 200 MeV entspricht $3{,}2 \cdot 10^{-11}$ Wattsekunden, für 1 Ws sind also $3{,}1 \cdot 10^{10}$ Spaltungen notwendig. Diese Zahl erscheint uns groß, doch für atomare Verhältnisse ist sie klein. Die vollständige Spaltung von nur 1 g Uran 235 liefert nämlich die gewaltige Menge von $8{,}3 \cdot 10^{10}$ Ws, das sind etwa 23000 kWh oder rund 1 Megawatt-Tag (MWd). Der Vergleich mit der Verbrennung von Kohle zeigt die Verhältnisse ebenso deutlich: Die Spaltung von 1 kg Uran liefert die Energie, zu deren Erzeugung in einem Kohlekraftwerk 10000 t Rohbraunkohle verbrannt werden müssen.
Die Gesamtenergie von 195 MeV, die bei der Spaltung eines Urankerns in einen Barium- und einen Kryptonkern frei wird, teilt sich annähernd folgendermaßen auf:

Kinetische Energie der Spaltprodukte	162 MeV
Energie der 2 bis 3 Spaltneutronen	6 MeV
Energie der prompten Gammastrahlung	6 MeV
Betazerfallsenergie	5 MeV
Gammazerfallsenergie	5 MeV
Neutrinoenergie	11 MeV

In dieser Bilanz zeigen sich auch die Schwierigkeiten bei der Nutzung der Kernenergie. Zum einen tritt unmittelbar beim Spaltakt eine intensive Gammastrahlung auf, zum anderen sind die Kerne der festen und gasförmigen Spaltprodukte nach der Spaltung durch ihren Neutronenüberschuß noch instabil und befinden sich außerdem in einem angeregten Zustand. Durch Beta- und Gammazerfall, deren Energie in der Bilanz erscheint, kehren sie nach mehr oder weniger langer Zeit in den energetischen Grundzustand stabiler Kerne zurück.

Aufbau eines Kernreaktors

Jeder Kernreaktor muß so eingerichtet sein, daß die den Menschen und seine Umwelt gefährdenden Spaltprodukte innerhalb der Reaktoranlage eingeschlossen bleiben. Außerdem muß gewährleistet sein, daß die unmittelbare Umgebung nicht durch die direkte Strahlung aus dem Reaktor belastet wird. Hier liegt die wesentliche Ursache für die umfangreiche und aufwendige Sicherheitstechnik, die beim industriellen Einsatz der Kernenergie erforderlich wird.

Spaltzone als aktiver Kern

Den Teil des Kernreaktors, in dem sich der Spaltstoff vermischt mit dem Moderatormittel befindet, bezeichnet man allgemein als die Spaltzone oder auch aktive Zone. In dieser Spaltzone, eine regelmäßige geometrische Form vorausgesetzt, hat die Anzahl der abgebremsten Neutronen je Volumeneinheit (Neutronendichte) ihren Höchstwert in der Mitte des Systems. Je mehr man sich dem Rand der Anordnung nähert, desto mehr verringert sich die Dichte der Neutronen infolge ihrer Abwanderung durch die Oberfläche der Spaltzone. Gleiches gilt auch für den Neutronenfluß.

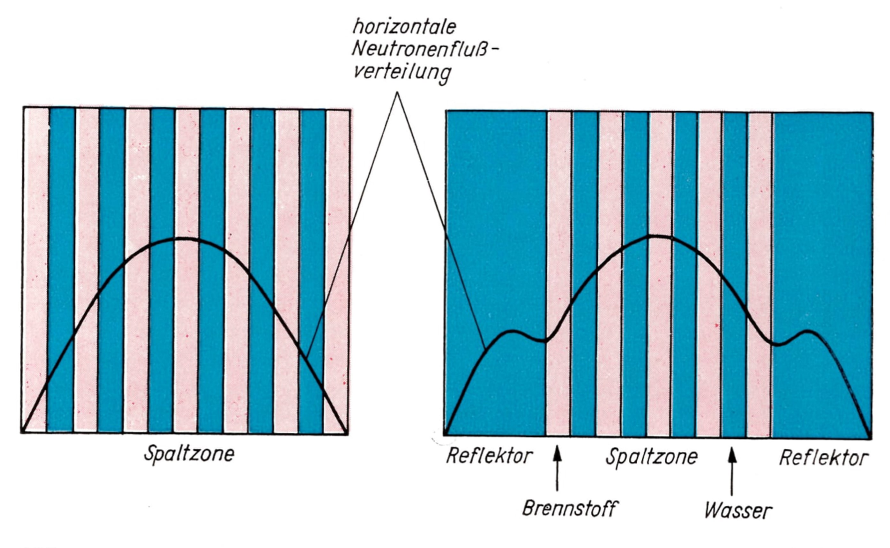
Der Begriff des Neutronenflusses wird häufig bei der Beschreibung eines Reaktors verwendet. Seine Größe berechnet man aus der Neutronendichte durch Multiplikation mit der mittleren Geschwindigkeit der abgebremsten Neutronen. Das Produkt kann man sich als die Summe aller Wege vorstellen, die von den Neutronen in einem Kubikzentimeter während einer Sekunde durchlaufen werden.

Reflektor hilft sparen

Die Verluste durch das Abwandern der Neutronen können verringert werden, wenn um die Spaltzone eine weitere Schicht aus Moderatormaterial, ein sogenannter Reflektor, aufgebaut wird. Wie es der Name schon andeutet, soll dadurch wenigstens ein Teil der herausfliegenden Neutronen in die aktive Zone zurückgestreut werden. Schnelle Neutronen, die entweichen wollen, werden hier abgebremst und ebenfalls teilweise wieder in den Bereich des Spaltstoffes zurückgestreut. Bild 80 zeigt den Neutronenfluß in einer Anordnung mit und ohne Reflektor und deutet an, daß der gleiche Höchstwert des Neutronenflusses bei einem Reaktor mit Reflektor schon mit einer kleineren Spaltzone erreicht wird.

Eine kleinere aktive Zone enthält, unter sonst gleichen Bedingungen, weniger Spaltstoff. Das kann zu einer Herabsetzung der Wärmeleistung des Reaktors

80 Neutronenfluß in der Spaltzone eines Kernreaktors ohne und mit Reflektor



führen. Durch den am Rand der Spaltzone infolge der Reflektorwirkung vergrößerten Neutronenfluß steigt jedoch die je Masseeinheit des Spaltstoffes erzeugte Leistung und bewirkt eine bessere Ausnutzung und damit einen sparsameren Verbrauch des Urans.
Das in der Spaltzone angeordnete Uran wird der Einfachheit halber Kernbrennstoff genannt, obwohl jeder weiß, daß der Vorgang der Kernspaltung nichts mit dem üblichen Begriff der Verbrennung zu tun hat. Anstelle der anfangs verwendeten Bezeichnung Uranbrenner oder Atommeiler für eine Anlage, mit deren Hilfe Energie durch Kernspaltung erzeugt wird, hat man sich heute auf den Namen Kernreaktor oder Kernkraftwerk geeinigt.

Neutronenmoderatoren

Wir kennen aus der Musik die Bezeichnung moderato für ein mäßig bewegtes Tempo. Der gleiche Stamm steckt in dem Wort Moderator, für das der Duden die Erläuterung »Bremsstoff für schnelle Neutronen« bereithält. Es waren schon hochgereinigter Graphit und schweres Wasser als solche Stoffe genannt worden, deren Atomkerne von den Neutronen bei Zusammenstößen einen großen Teil der Bewegungsenergie übernehmen, dabei aber in äußerst geringem Maße die Neutronen einfangen.

Graphit

Sowohl *Fermi* in den USA als auch *Kurtschatow* in der Sowjetunion verwendeten unabhängig voneinander für die ersten Versuchsreaktoren Graphit als Moderatormittel. Das war kein Zufall.
Der für diesen Zweck eingesetzte Graphit wird künstlich, durch Rekristallisation von kohlenstoffhaltigen Materialien bei hoher Temperatur hergestellt. Er ist billig, genügend fest, läßt sich mechanisch bearbeiten und hat außerdem eine gute Feuerfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit. Wenn auch seine Bremseigenschaften verglichen mit Wasserstoff etwas schlechter sind, stellt er doch durch die genannten Eigenschaften ein geeignetes Mittel für Versuchsaufbauten dar, insbesondere durch die Möglichkeit, nach dem Bausteinprinzip eine beliebig große Anordnung zusammenzusetzen.
Nachteilig ist, daß Neutronen- und Gammastrahlen die kristalline Struktur des Graphits verändern und sich dadurch einige seiner Eigenschaften verschlechtern. Trotz des sogenannten Aufquellens, das mit der Bestrahlungsdosis zunimmt und wobei die Volumenvergrößerung einige Prozent erreichen kann, erhöhen sich die Härte und die Festigkeit des Graphits. Außerdem wird seine Wärmeleitfähigkeit geringer.
Die physikalischen Eigenschaften und sogar die Abmessungen der Graphitteile können weitgehend durch Ausglühen bei Temperaturen von etwa 1000 bis 1500 °C wiederhergestellt werden. Diese Möglichkeit scheint eine der Ursachen dafür zu sein, daß sich in modernen Hochtemperaturreaktoren, in denen derartige Temperaturen erreicht werden, Graphit als Struktur- und Moderatormaterial sehr gut bewährt hat.
Die feste Zustandsform des Graphits, die bei Versuchsaufbauten vorteilhaft ist, ist beim Einbau in Reaktoren insofern von Nachteil, als er in dieser Form nicht als Kühlmittel dienen kann. Bei Kernreaktoren mit Graphit als Moderator muß deshalb zusätzlich ein Kühlmittel eingesetzt werden, das im gesamten Temperaturbereich gut mit Kohlenstoff in reiner Form verträglich ist. Das könnte Kohlendioxid oder auch Heliumgas sein, die außerdem als Schutzgas wirken und eine Reaktion mit Luftsauerstoff oder Wasserdampf verhindern. Die Dichte der Gase ist jedoch auch unter Druck niedriger als die des festen Moderatormaterials, so daß in den Volumenanteilen, durch welche die Kühlgase strömen, die Neutronen kaum abgebremst werden.

Schweres Wasser

Obwohl schweres Wasser (D_2O) ausgezeichnete Eigenschaften hinsichtlich des Bremsvermögens und der geringen Neutronenabsorption aufweist, hat es den großen Nachteil, daß die Herstellung des D_2O recht aufwendig und teuer

ist. Natürliches Wasser enthält nämlich nur 1 Molekül D_2O auf 6500 Moleküle H_2O.

Die erste Anlage zur Abtrennung des schweren Wassers entstand schon vor dem zweiten Weltkrieg in Norwegen, in der Nähe von Rjukan, etwa 120 km westlich von Oslo. Die Norsk-Hydro-Gesellschaft konnte dabei den großen Bedarf an elektrischer Energie für das verwendete elektrolytische Verfahren aus dem dort gelegenen Wasserkraftwerk decken.

Im zweiten Weltkrieg wurde die Schwerwasserfabrik von deutschen Truppen besetzt. Da man sich in Deutschland für D_2O als Moderator für den ersten Reaktor entschieden hatte, war man auf die Anlage in Rjukan angewiesen. Die Verwendung von Kohlenstoff als Moderator hatte man – einer Äußerung *Heisenbergs* zufolge – auf Grund einer, wie sich später herausstellte, fehlerhaften Messung der Absorptionseigenschaften von Kohlenstoff vorzeitig aufgegeben. Die Untersuchungen waren in einem sehr angesehenen Institut vorgenommen worden und wurden von den unmittelbar am Reaktorprojekt beteiligten Physikern nicht noch einmal nachgeprüft.

Kein kritischer Reaktor in Deutschland bis Kriegsende

Norwegische Antifaschisten verhinderten jedoch mit großem Einsatz umfangreiche Transporte nach Deutschland. Aus diesem Grunde standen bis zum Ende des Krieges die benötigten fünf Tonnen D_2O nicht zur Verfügung, so daß die zuletzt in Haigerloch stationierte Versuchsanlage nie den kritischen Zustand erreichen konnte. Bis zum Ende des zweiten Weltkrieges ist es also den deutschen Physikern nicht gelungen, eine Kettenreaktion der Kernspaltung in Gang zu setzen.

Heute wird D_2O im großen Maßstab in Kanada und den USA mit einem Schwefelwasserstoffverfahren hergestellt. Die Produktion belief sich 1975 auf etwa 600 t im Jahr. Bei dieser Methode wird bei hoher Temperatur Deuterium im Schwefelwasserstoff angereichert und bei niedriger Temperatur an Wasser wieder abgegeben. In einer Gegenstromanordnung zwischen einer heißen und einer kalten Kolonne ergibt sich für den kalten Abschnitt eine Deuteriumanreicherung.

Bei einer jährlichen Steigerung der Preise um 2 bis 3% in Kanada wird damit gerechnet, daß der Preis von 1975 (65 Dollar je Kilogramm) bis 1980 auf fast 100 Dollar je Kilogramm D_2O ansteigt. Bei diesem Preisniveau würden etwa 15% der Investitionskosten der kanadischen CANDU-Reaktoren auf das schwere Wasser entfallen. Bei den Betriebskosten schätzt man einen Bedarf von 300 bis 500 Dollar je MW und Jahr für den Ausgleich von Verlusten an D_2O.

Normales Wasser

Die hohen Preise und die Abhängigkeit von speziellen Werken zur Herstellung des schweren Wassers brachten die Wissenschaftler schon frühzeitig darauf, sich nach einem billigeren und leichter verfügbaren Bremsmittel umzusehen. Für diesen Zweck bietet sich natürliches Wasser an, das bei der Größe des Bedarfs in ausreichender Menge und verhältnismäßig billig zur Verfügung steht. Der darin enthaltene normale Wasserstoff bremst sogar die Spaltneutronen mit noch weniger Zusammenstößen auf thermische Energien ab als der schwere Wasserstoff. Er fängt jedoch in relativ starkem Maße Neutronen ein.

Dadurch wird der Neutronenhaushalt so stark negativ belastet, daß eine Anordnung mit natürlichem Uran als Brennstoff und Wasser als Moderator unter keinen Umständen den kritischen Zustand erreicht.

Wirkungsquerschnitt

Zur Beschreibung der Vorgänge bei Kernprozessen hat man als Hilfsbegriff den Wirkungsquerschnitt eingeführt. Er ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, daß eine bestimmte Reaktion eintritt. Rein mechanisch betrachtet, kann ein Neutron mit einem Atomkern nur dann zusammenstoßen, wenn es ihn direkt trifft. In Wirklichkeit ist aber die Wechselwirkung zwischen Kern und Neutron nicht auf den geometrischen Querschnitt des Kerns beschränkt, sondern findet, bedingt durch den Charakter der Kernkräfte, in einem bestimmten Bereich um den Kern herum statt. Der Wirkungsquerschnitt ist der anschauliche Begriff für die Fläche des Wirkungsbereiches eines Kerns für jeden in Frage

Tabelle 2. Vergleich der Bremsmittel für Neutronen
1,75 MeV – mittlere Energie der Spaltungsneutronen
0,025 eV – thermische Energie

	Wasserstoff H 1	Schwerer Wasserstoff D 2	Beryllium Be 9	Graphit C 12	Uran U 238
Zahl der Zusammenstöße zur Abbremsung von 1,75 MeV auf 0,025 eV	18	25	86	114	2172
Einfangquerschnitt für thermische Neutronen in 10^{-28} m² (Barn)	0,325	0,0005	0,0085	0,005	2,8

kommenden Prozeß. Nur wenn das Neutron die Fläche dieser gedachten Scheibe trifft, kommt es zu einer Reaktion. Möglich sind die Spaltung des Kerns, der Einfang (Absorption) oder die Streuung des Neutrons durch den Kern.

Ursprünglich war als Einheit des Wirkungsquerschnitts das Quadrat des Durchmessers eines Wasserstoffatomkerns festgelegt worden, das ist eine Fläche von 10^{-28}m². Die Einheit trug die Bezeichnung Barn, die aus dem Englischen kommt und zu deutsch Scheunentor bedeutet. Die Wirkungsquerschnitte für Neutronen können Werte von 10^{-22} m² erreichen, d. h. millionenfach größer sein. Das weist darauf hin, daß Neutronen, auch wenn sie in einer relativ großen Entfernung am Kern vorbeifliegen, mit diesem noch in Wechselwirkung treten können.

Tabelle 2 enthält die Einfangquerschnitte der in Frage kommenden Neutronenmoderatoren. Zum Vergleich ist ein schweres Element (Uran 238) hinzugefügt.

Angereichertes Uran

Wenn bei Verwendung von Wasser als Moderator häufiger Neutronen eingefangen werden, muß man dafür sorgen, daß die Neutronen auch häufiger auf spaltbare Kerne treffen, damit insgesamt der Neutronenhaushalt wieder ausgeglichen und die Kettenreaktion der Kernspaltung aufrechterhalten werden kann. Das gelingt durch den Einsatz von angereichertem Uran. Damit ist ein Urangemisch gemeint, in dem das Uran 235 gegenüber der natürlichen Isotopenmischung zu einem höheren Prozentsatz enthalten ist. Die Herstellung des angereicherten Urans wirft ihrerseits aber wieder die Fragen der Energiebereitstellung für die Trennverfahren auf und macht besondere Anlagen erforderlich.

Welcher der beiden Wege insgesamt günstiger ist, scheint schon durch die große Zahl der mit H_2O moderierten Reaktoren in der Welt gegenüber den wenigen mit D_2O moderierten entschieden. Doch gibt man besonders in Kanada und Indien die Hoffnung nicht auf, auch mit Schwerwasserreaktoren die Kernenergie ökonomisch verwerten zu können. Bei den Forschungen hat sich zur Stützung dieser Bemühungen herausgestellt, daß der Abbrand (s. S. 147), der bisher mit 7000 MWd je t Uran eine recht niedrige Brennstoffausnutzung anzeigt, um etwa 80 % gesteigert werden kann, wenn das Uran 235 auf nur 0,9 % angereichert wird.

Blick in die »Welt der Atome«

Bisher wurde noch völlig beiseite gelassen, wie der Prozeß der Kettenreaktion der Kernspaltung zeitlich abläuft und welche Möglichkeiten für uns bestehen, diesen Vorgang nach unseren Wünschen zu steuern. Wir wissen jedoch schon, daß dabei alles von den Neutronen abhängt, von ihrem Lebensweg, den sie von der Geburt bei der Spaltung eines Kerns bis zu ihrem Ende zurücklegen, auf dem sie entweder einen weiteren Kern spalten, von nichtspaltbaren Kernen eingefangen werden oder aus dem Reaktor herausfliegen. Alle diese Prozesse spielen sich zwischen Atomkernen und den Neutronen in der atomaren Welt ab und gestatten uns keine Anschaulichkeit der Größenvorstellung mehr. Trotzdem wollen wir uns zum besseren Verständnis einen Durchblick durch die Verhältnisse in der Mikrowelt verschaffen, indem wir mit Zahlen und Maßstäben spielen, die eigentlich nur in der Makrowelt gebräuchlich sind.

Anschaulicher Maßstab

Bei einer Vergrößerung aller Abmessungen um den Faktor 1 Billion (10^{12}) ergibt sich folgendes Bild: Die äußere Elektronenhülle eines Atoms hat einen Radius von 100 m, der Atomkern dagegen nur den geringen Durchmesser von 1 cm, und das die Kettenreaktion weitertragende Neutron ist sogar noch um den Faktor 10 kleiner. Das sind jedoch Größen, die für uns anschaulich sind und uns eine Vorstellung davon vermitteln, welchen kleinen Raum die Atomkerne einnehmen und wieviel freier Raum um sie herum existiert. In dem geringen Volumen des Kerns ist die wesentliche Masse des Atoms konzentriert. Diese Dichte in die Makrowelt übertragen, ergibt einen unvorstellbaren Wert für die Masse eines Kubikzentimeters Kernflüssigkeit aus dichtgepackten Protonen und Neutronen, nämlich 140000 Millionen Kilogramm.

Durch die verhältnismäßig weiten Räume zwischen den Kernen bewegen sich ungestört durch elektrische Kräfte die winzigen Neutronen. Das wirft natürlich die Frage auf, wieso die Neutronen trotzdem einmal auf einen Kern treffen, den sie spalten. Während die neugeborenen Neutronen Geschwindigkeiten bis zu 40000 km/s aufweisen, bewegen sich die soweit als möglich abgebremsten Neutronen im Mittel immerhin noch mit etwa 2 km/s. Langsamer können sie nicht mehr werden. Ihre Bewegungsenergie entspricht der durch die Wärmebewegung bedingten kinetischen Energie der Moderatormoleküle in der Anordnung, mit denen die Neutronen hin und wieder zusammenstoßen. Dadurch stellt sich ein energetischer Gleichgewichtszustand ein. Die Geschwindigkeit der Neutronen ist aber trotzdem ausreichend, auch wenn sie als langsam oder thermisch bezeichnet werden, um schließlich doch noch auf einen Kern zu treffen, den sie spalten.

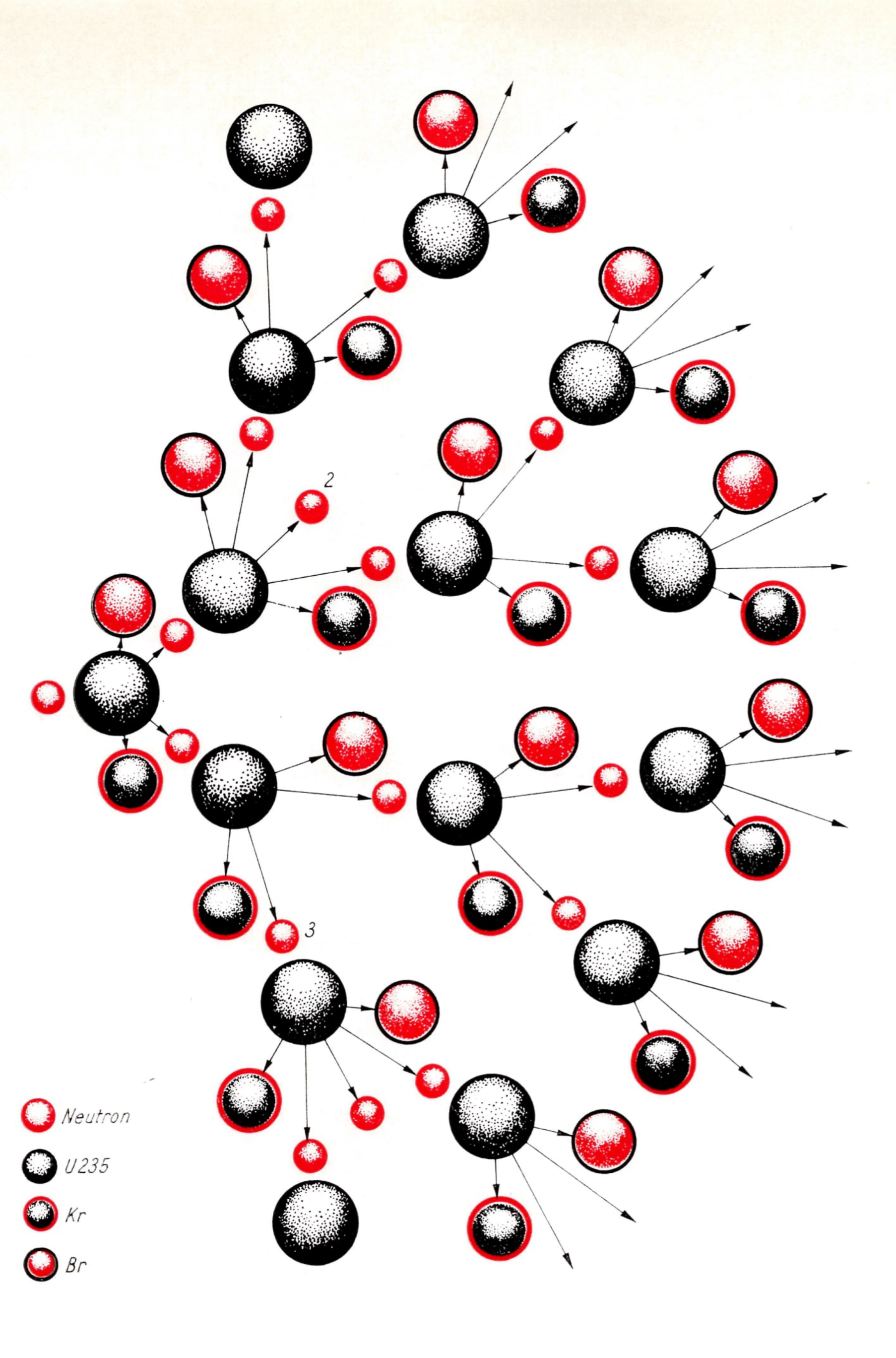
Große Wechselwirkung bei langsamer Geschwindigkeit

Alle diese Betrachtungen zeigen uns, wie schwierig es ist, sich mit dem Eintritt in die Mikrowelt ein anschauliches Bild der sich dort abspielenden Vorgänge zu verschaffen. Dabei sollten wir uns auch immer darüber klar sein, daß die uns verständlichen Begriffe aus der unmittelbar sichtbaren Welt nur mit äußerster Vorsicht verwendet werden dürfen.

Biographie der Neutronen

Nachdem wir viele Möglichkeiten der Wechselwirkung der Neutronen mit den Reaktormaterialien kennengelernt haben, wollen wir die Lebensgeschichte eines Neutrons in einem Kernreaktor zusammenfassend betrachten: Es wird als schnelles Neutron mit einigen Megaelektronenvolt Energie bei der Kernspaltung geboren und verläßt den zerplatzenden Kern in einer bestimmten Richtung. Nach einer Flugstrecke, deren Länge hauptsächlich von den Wirkungsquerschnitten der Moderatoratomkerne für elastische Streuung abhängt, stößt es mit einem dieser Kerne zusammen und verliert dabei Energie. Dieser Vorgang wiederholt sich (vgl. Tabelle 2) bis das Neutron nach etwa einer hunderttausendstel Sekunde thermische Energien erreicht hat. Während dieses

Geburt



81 Anschwellende Kettenreaktion im Uran 235
1 auslösendes Neutron; 2 entweichende Neutronen; 3 Neutronen, die weitere Kernspaltungen auslösen

Bremsung Bremsprozesses kann es durchaus schon eine Richtung einschlagen, die aus dem System herausführt, oder durch das Uran 238 eingefangen werden.

Diffusion Das thermische Neutron bewegt sich eine gewisse Zeit, die Diffusionszeit genannt wird und bei Wasserreaktoren etwa 0,0002 s beträgt, im System, behält seine Energie durch weitere Streuprozesse an Moderatoratomkernen und trifft im günstigsten Fall auf einen Brennstoffatomkern, den es spaltet. Es kann aber auch vorher aus der Anordnung hinausgestreut, im Uran 238, im Moderatormaterial, in Spaltprodukten oder im Strukturmaterial der Anlage absorbiert werden.

Zahlenmäßig kommt etwa folgende Aufteilung für eine Neutronengeneration in einem kritischen Reaktor zustande:

Bilanz

100 Neutronen verursachen eine Spaltung im Brennstoff,
230 schnelle Neutronen entstehen bei den Spaltungen, von denen
20 als schnelle Neutronen aus dem System entweichen,
40 Neutronen im Uran 238 absorbiert werden und
170 Neutronen durch den Bremsprozeß thermische Energien erreichen, von denen wieder
20 als thermische Neutronen aus dem System entweichen,
30 im Uran 238 absorbiert werden,
20 im Moderator, im Strukturmaterial, in Spaltprodukten absorbiert werden und
100 Neutronen wiederum Spaltungen im Brennstoff verursachen.

In diesem Fall bleibt also im Zeitverlauf immer die gleiche Menge von Neutronen erhalten. Der Vermehrungsfaktor, für ein reales Reaktorsystem auch effektiver Multiplikationsfaktor genannt, ist hier gleich 1.

Steuerung der Neutronenerzeugung Für einen sicheren Ablauf der Kettenreaktion ist es notwendig, diesen Vorgang mit den uns zur Verfügung stehenden Mitteln zu steuern. Insbesondere können wir ja nur so schnell eingreifen, wie es die elektronischen und mechanischen Hilfsmittel gestatten. Der größte Teil aller Spaltneutronen, der sogenannte prompte Anteil, wird aber innerhalb der sehr kurzen Zeitspanne von 10^{-14} s freigesetzt. Auch wenn im Mittel eine neue Generation von Spaltneutronen z. B. im wassermoderierten Reaktor erst in 0,0002 s geboren wird, liegen wir noch aussichtslos im Rennen. Doch ein bisher noch nicht genannter Umstand entscheidet die Sachlage zu unseren Gunsten.

Die Bruchstücke der gespaltenen Kerne kehren nicht nur durch Aussendung radioaktiver Strahlung in den energetischen Grundzustand zurück, sie setzen dabei auch Neutronen frei. Entscheidend ist, daß diese Neutronen erst

Verzögerte Neutronen innerhalb einiger Sekunden bis zu Minuten nach vorangegangenem Betazerfall entstehen. Richtet man es so ein, daß nur mit diesem, wenn auch mit weniger als 1% geringen Beitrag der sogenannten verzögerten Neutronen der Reaktor kritisch wird, dann ist die nötige Zeit gewonnen, in der mechanisch bewegte und elektronisch gesteuerte Regelorgane wirksam werden können.

Der Anteil der verzögerten Neutronen liegt für Uran 235 als Spaltstoff bei 0,7% der Gesamtzahl der Spaltneutronen. Dieser Wert ist zwar ausreichend groß für die Möglichkeit der Steuerung, die mittlere Generationszeit wächst dadurch auf etwa 0,1 s an, aber absolut gesehen ist er klein. Deshalb muß sehr aufmerksam dafür gesorgt werden, daß die verzögerten Neutronen für die Gesamtbilanz des kritischen oder leicht überkritischen Neutronenhaushalts immer einen Beitrag leisten und nie das System allein durch die prompten Neutronen kritisch oder gar überkritisch wird und wie man so sagt »durchgeht«. Sollten tatsächlich einmal alle Sicherheitsvorkehrungen versagen und dieser Fall eintreten, würde trotzdem ein Kernreaktor nicht wie eine Kernspaltungsbombe explodieren. Das ist nur in reinem Uran 235 oder Plutonium 239 und da auch nur unter speziellen Bedingungen möglich (Bild 81).

Innere Sicherheit des Reaktors

Die Kernreaktoren haben eine ihnen inhärente, d. h. innewohnende Sicherheit, für die folgender Effekt verantwortlich ist. Eine lawinenartig anschwellende Kettenreaktion in einem prompt überkritischen System hat eine stärkere Wärmeentwicklung zur Folge. Bei gleichbleibender Kühlung erhöht sich dadurch die Temperatur in der gesamten Anlage. Durch die Erwärmung verändern sich die Dichte und die Kerneigenschaften aller in der Spaltzone befindlichen Materialien.

Resonanzeinfang

Der wichtigste Effekt ist dabei die Erhöhung des Resonanzeinfangs im Uran 238. Die steigende Temperatur führt zu größeren Schwingungen der Atome um ihre Ruhelage im Kristallgitter des Brennstoffs. Im gleichen Rhythmus verändern sich auch die relative Geschwindigkeit der Neutronen gegenüber den Brennstoffatomen. Dadurch wächst die wirksame Breite der Resonanzspitzen des Einfangsquerschnitts (Bild 82), und die Neutronen gehen während des Bremsprozesses mit größerer Wahrscheinlichkeit verloren.

Wärmeausdehnung

Die durch die Wärmeausdehnung verringerte Dichte bedeutet eine verringerte Anzahl von Atomen je Volumeneinheit und dadurch eine schwächere Wechselwirkung der Neutronen mit der Materie. Sie legen bei allen möglichen Reaktionen größere Strecken zurück und entweichen deshalb als schnelle und auch als langsame Neutronen mit größerer Wahrscheinlichkeit aus dem Reaktor. Beide Vorgänge belasten den Neutronenhaushalt im ungünstigen Sinne und vermindern die Neutronenvermehrung. Man sagt, der Reaktor hat einen negativen Temperaturkoeffizienten. Die Leistung wird bei leichtem Ansteigen ohne äußere Einwirkung selbsttätig wieder verringert. Dieser Regelmechanismus wirkt auch umgekehrt bei Leistungsminderung.

Selbsttätige Regelung

Ist das System durch irgendein Ereignis plötzlich stark überkritisch, kann die dann entstehende sehr große Wärmemenge allerdings die Spaltzone zum Schmelzen bringen, ehe der negative Temperaturkoeffizient wirkt, und bei flüssigem Kühlmittel kann das zu einer Überhitzungsexplosion führen. Eingehende theoretische und praktische Untersuchungen haben gezeigt, daß aber in jedem Fall die Kettenreaktion dabei abgebrochen wird. Deshalb ist es falsch, Kernreaktoren als latente Atombomben zu bezeichnen.

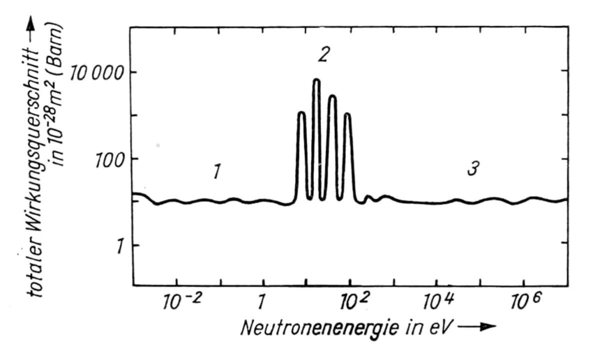
Bei kleineren unvorhergesehenen Abweichungen vom kritischen Zustand in beiden Richtungen kommt es höchstens zu einer gedämpften Schwingung um den bisherigen Wert der Reaktorleistung. Ein Reaktor mit negativem Temperaturkoeffizient ist also in bestimmten Grenzen selbstregelnd.

Man verläßt sich nie allein auf diese selbstregelnde Eigenschaft des Reaktors.

Kontrolle der Wärmeleistung

Es ist vorgeschrieben, in jedem Fall den Neutronenfluß zu kontrollieren, der als Maß für die Wärmeleistung des Systems verwendet werden kann. Er wird mit Hilfe von Neutronendetektoren und entsprechenden elektronischen Apparaturen registriert.

Der Neutronenfluß ist der in der Spaltzone erzeugten Wärmeleistung direkt und



82 Totaler Wirkungsquerschnitt von Uran 238. Überwiegende Prozesse: 1 Streuung; 2 Einfang im Resonanzbereich; 3 Streuung und Spaltung

der im Reaktor vorhandenen Menge spaltbaren Materials umgekehrt proportional. Wird der Neutronenfluß in Neutronen je Quadratzentimeter und Sekunde, die Wärmeleistung in Megawatt und die Spaltstoffmasse in Kilogramm angegeben, hat der Proportionalitätsfaktor etwa den Wert $2 \cdot 10^{13}$. Beispielsweise muß in einem Reaktor mit 20 kg Uran 235 der mittlere Neutronenfluß 10^{13} Neutronen/$cm^2 \cdot s$ betragen, damit eine Wärmeleistung von 10 MW erreicht werden kann.

Unabhängige Nachweisketten

Zur Erhöhung der Sicherheit gibt es mehrere völlig unabhängig voneinander wirkende Nachweisketten zur Verarbeitung der Neutronenflußsignale. Sobald nach der elektronischen Verstärkung bestimmte einstellbare Schwellwerte überschritten oder unterschritten werden und damit eine unerwünschte Änderung der Wärmeleistung angezeigt wird, sprechen zusätzliche Apparaturen an. Diese lösen eine Bewegung von Regelstäben in dem Sinne aus, daß der ursprüngliche Zustand wiederhergestellt wird.

Reaktivität

Im Normalbetrieb eines Reaktors werden alle Parameter so eingestellt, daß der kritische Zustand des Systems ständig erhalten bleibt. Es ist in bestimmten Situationen aber auch notwendig, den Reaktor etwas überkritisch oder unterkritisch einzuregeln. Beispielsweise ist das der Fall, wenn die Wärmeleistung des Systems erhöht oder gesenkt werden soll. Ein international gebräuchliches Maß für die Abweichung vom kritischen Zustand ist die Reaktivität.

Was ist Reaktivität?

Die Reaktivität gibt die prozentuale Abweichung des Vermehrungsfaktors der Neutronen (s. S. 142) von 1 an; sie ist gleich null für den kritischen Reaktor. Für den überkritischen Reaktor hat sie positive und für den unterkritischen Reaktor negative Werte. Soll z. B. die Leistung des Reaktors erhöht werden, und der Reaktor wird durch Einstellung einer positiven Reaktivität überkritisch, dann steigt der Neutronenfluß im System an. Die zeitliche Zunahme ist abhängig von der Größe der positiven Reaktivität, in noch stärkerem Maße aber von der Generationszeit der Neutronen. Das ist die Zeit, die im Mittel nach einer Spaltung vorgeht, bis die nächste Generation Neutronen wiederum spaltet.

Generationszeit

Nehmen wir einmal eine geringe positive Abweichung vom kritischen Zustand um 0,05% an, dann steigt der Neutronenfluß in einer Sekunde etwa um den Faktor 150 an, wenn es ausschließlich nur prompte Neutronen im System geben sollte. Die dämpfende Rolle der vergrößerten Neutronen bewirkt jedoch in der Praxis, daß bei dem gleichen Reaktivitätswert in derselben Zeitspanne der Neutronenfluß nur um den Faktor 1,005 ansteigt und so gut kontrolliert und mit mechanischen Mitteln geregelt werden kann.

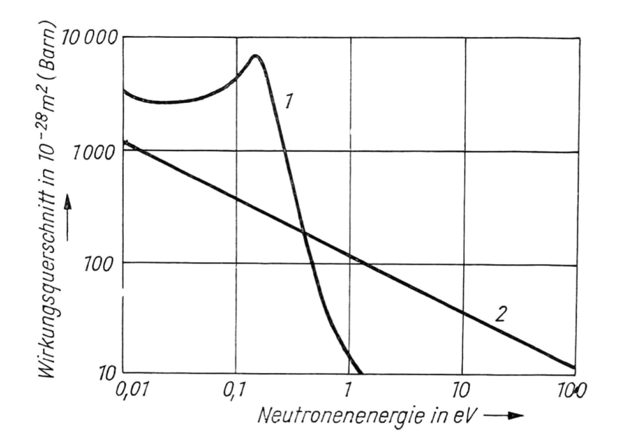
Steuerung des Reaktors

Die Wärmeleistung eines Kernreaktors kann man durch einen unmittelbaren Eingriff in das Gleichgewicht des Neutronenhaushalts ändern. Zu diesem Zweck werden bei den thermischen Reaktoren bewegliche Stäbe in die Spaltzone eingesetzt. Der wirksame Teil dieser sogenannten Regelstäbe enthält Isotope, die über ein starkes Absorptionsvermögen für thermische Neutronen verfügen. Das sind hauptsächlich Bor 10 und Kadmium 113 (Bild 83).

Änderung der Leistung

Beim Einfahren der Regelstäbe in die Spaltzone eines kritischen Reaktors vergrößert sich der Neutronenverlust durch den zusätzlichen Einfang von thermischen Neutronen, dadurch verringert sich der effektive Multiplikationsfaktor (s. S. 142) auf einen Wert unter 1. Das System hat jetzt eine negative Reaktivität und senkt seine Leistung langsam ab. Ist die gewünschte niedere Leistungsstufe erreicht, wird der Regelstab wieder so weit herausgefahren, bis sich wieder ein effektiver Multiplikationsfaktor von 1 ergibt, der Reaktor also wieder kritisch ist.

83 Effektiver Wirkungsquerschnitt für Neutroneneinfang 1 Kadmium; 2 Bor



Bei einer Leistungserhöhung arbeitet man gerade umgekehrt. Werden die Regelstäbe aus der aktiven Zone herausgezogen, steigt die Leistung entsprechend dem positiven Reaktivitätswert an. Ist der vorgegebene Leistungswert erreicht, werden die Stäbe wieder so weit eingefahren, bis der kritische Zustand wiederhergestellt ist.

Auf diese Weise kann in den Grenzen der Wirksamkeit der verzögerten Neutronen die Leistung des Reaktors durch die Regelstäbe gesteuert werden. Es muß dabei unbedingt gesichert sein, daß der Reaktor nicht allein schon durch die prompten Neutronen überkritisch wird und die verzögerten Neutronen ihre dämpfende Wirkung verlieren. Das hätte einen unerwünschten schnellen Anstieg des Neutronenflusses zur Folge und würde über eine Sicherheitselektronik eine Abschaltung des Reaktors bewirken. Diese Überwachungsanlagen sprechen nicht nur beim Überschreiten vorgegebener Grenzwerte an, sondern reagieren auch auf einen zu schnellen Anstieg des Neutronenflusses, ehe ein Grenzwert erreicht worden ist, und lösen den Abwurf von sogenannten Schnellabschaltstäben aus. Das sind zusätzlich vorhandene Stäbe mit großem Absorptionsvermögen, die in derartigen Situationen im freien Fall in die Spaltzone eindringen. Das hat einen sehr schnellen Leistungsabfall zur Folge. Es ist üblich, in solchen Störfällen auch alle Regelstäbe automatisch in die Spaltzone einzufahren und so den Leistungsabfall noch zu verstärken. Der Abfall der Abschaltstäbe kann selbstverständlich auch durch einfachen Tastendruck ausgelöst werden.

Überwachungsanlagen

Die Beladung des Kernreaktors mit Spaltmaterial wird so bemessen, daß die Regelstäbe im kritischen Zustand etwa halb in die Spaltzone eingefahren sind, damit für alle in Frage kommenden Leistungsänderungen ein günstiger Regelbereich gesichert ist.

Anlassen des Reaktors

Wir setzen hier voraus, daß der Kernreaktor mit ausreichendem Spaltmaterial und Moderatorsubstanz beladen ist, so daß der kritische Zustand des Systems mit Hilfe der Regelstäbe erreicht werden kann. Die dazu notwendige Menge an Spaltmaterial wird bei neu aufzubauenden Reaktoren oder veränderten Anordnungen theoretisch berechnet und die ermittelten Werte in sogenannten »kritischen Experimenten« überprüft.

Kritisches Experiment

Solche kritischen Experimente verlaufen immer mit einer gewissen Spannung und haben auch heute, über 35 Jahre nach der ersten gelungenen Kettenreaktion nicht ihren Reiz für die Physiker und Reaktoringenieure verloren. Aus Sicherheitsgründen setzt man in jedem Falle eher zuwenig als zuviel Spaltmaterial ein. Wenn dann schließlich, meist nach einigen Zuladungen, die

Instrumente anzeigen, daß die Kettenreaktion sich selbst aufrechterhält, hat man die kritische Masse erreicht.
Um während der Inbetriebnahme des Reaktors unerwünschte Abschaltungen durch die elektronische Überwachungsanlage zu vermeiden, sind für das Anheben der Regeleinheiten Höchstgeschwindigkeiten festgelegt. Diese Werte liegen niedriger, wenn anfangs erst wenige durch spontane Spaltung oder Höhenstrahlung erzeugte Neutronen vorhanden sind und die Kontrolldetektoren sehr wenige Signale registrieren, so daß der Anstieg des Neutronenflusses noch schwieriger zu überwachen ist.

Niedriger Neutronenpegel gebietet Vorsicht

Bei kleinen Reaktoren ist es vorgeschrieben, vor dem Start eine künstliche Neutronenquelle in die Spaltzone einzufahren. Durch die zusätzlichen Neutronen wird im Reaktor ein bestimmter Neutronenfluß und an den Kontrollinstrumenten ein festgelegter Mindestausschlag gesichert.
Beim Anlassen des Reaktors werden zuerst einzeln die Schnellabschaltstäbe gehoben und dann ein Regelstab nach dem anderen langsam aus der Spaltzone herausgezogen, bis sich ein solcher positiver Wert der Reaktivität einstellt, auf den das System mit einem genügend langsamen Anstieg der Leistung antwortet. Dann macht es keine Schwierigkeiten, kurz vor dem Erreichen des vorgesehenen Leistungsniveaus die Regelstäbe wieder so weit zu senken, bis der kritische Zustand und damit der normale Betriebszustand erreicht ist.

Kernreaktor auf vollen Touren

Wir wissen jetzt vom Betrieb eines Kernreaktors schon eine ganze Menge: das Anlassen, die Steuerung, die Selbstregelung durch den negativen Temperaturkoeffizienten, die automatische Regelung und das Abschalten.
Wird ein Kernreaktor bei hoher Leistung betrieben, treten einige Effekte auf, die uns noch nicht bekannt sind. Der größte Teil dieser Erscheinungen ist leider nicht zu vermeiden und bereitet dem Betriebspersonal nicht geringe Sorgen.

Strahlende Asche

Bei der Verbrennung von Kohle bleibt die Asche als nichtbrennbarer Rest übrig. Der Rauch, ohne den es kein Feuer gibt, verläßt den Ofen über den Schornstein. Wie ist das nun bei der Kernspaltung von Uran mit der Asche und dem Rauch? Die Rückstände dieses Prozesses sind die sogenannten Spaltprodukte, die aber nicht wie Asche und Rauch behandelt werden können. Die Notwendigkeit, für den selbsttätigen Ablauf der Kettenreaktion eine Mindestmenge von Kernbrennstoff, die kritische Masse, vereinigt zu haben und die lästige, aber unvermeidliche Radioaktivität der Reaktorasche erfordern eine wesentlich andere »Heiztechnik« als sie sonst in Kraftwerken üblich ist.

Heiztechnik am Reaktor

Im Kohlekraftwerk wandert in ständigem Fluß neue Kohle in die Feuerung, während zugleich die Asche entfernt wird. Zu Anfang kann man das Feuer mit einer ziemlich kleinen Menge Heizmaterial entfachen. Ein Kernreaktor dagegen muß zu Anfang mindestens mit einer so großen Menge an Kernbrennstoff beladen werden, wie es der kritischen Masse entspricht, sonst kommt die Kettenreaktion der Kernspaltung gar nicht erst in Gang.
Bei dem größten Teil aller Kernreaktoren sind Brennstoff und Moderator getrennt angeordnet. Die bei den Kernspaltungen gebildeten Bruchstücke, die wegen ihrer Größe nur eine geringe Reichweite haben, verbleiben deshalb vorwiegend im Brennstoffteil und durchsetzen ihn nach und nach mit »Asche«.

Es geht nicht ohne Reserven

Da einige dieser Spaltprodukte einen sehr großen Einfangquerschnitt für thermische Neutronen aufweisen, belasten sie den Neutronenhaushalt beträchtlich und müssen durch zusätzlichen Brennstoff ausgeglichen werden. Brennstoff- und damit sogenannte Reaktivitätsreserven sind aber wegen der Gefahr der Überkritizität aus Sicherheitsgründen nur in begrenztem Umfang vorhanden. Sie müssen zudem anfangs durch zusätzlich eingesetzte Neu-

tronenabsorber ausgeglichen werden. Hohe Absorberkonzentrationen sind jedoch unzulässig, da sie z. B. im Falle von Bor in wassermoderierten Reaktoren den erwünschten negativen Temperaturkoeffizienten abschwächen.
Die normalen Regelstäbe können in diese Bilanz nur in geringem Maße einbezogen werden, da nach den strengen Vorschriften der Betriebsführung der Reaktor zu jeder Zeit auch mit einem Teil dieser Stäbe abschaltbar sein muß.
So ist es nicht zu umgehen, daß nach einiger Betriebszeit, bei den üblichen Kernkraftwerken ist das etwa ein Jahr, die zulässigen Reserven aufgebraucht sind. Der Betrieb muß abgebrochen werden, da das System nicht mehr in den kritischen Zustand gebracht werden kann.
Zu diesem Zeitpunkt ist aber noch nicht das gesamte Uran gespalten. Der bislang noch relativ niedrige Verarbeitungsgrad ist ein wesentlicher Nachteil aller bisherigen Kernreaktoren. Das Ziel zahlreicher Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet ist es deshalb, Reaktoren mit einer besseren Ausnutzung des Brennstoffs zu konstruieren.

Abbrand

Es ist üblich, den Verbrauch des Kernbrennstoffs als Abbrand zu bezeichnen und an der Energieerzeugung je Tonne Spaltmaterial zu messen. Als Einheit wird dabei die Größe Megawatt-Tage je Tonne (MWd/t) verwendet. Diese Angabe vermittelt eine anschauliche Vorstellung vom Verarbeitungsgrad des Urans. Es sei daran erinnert, daß bei vollständiger Spaltung von 1 g Uran 235 ja gerade eine Energie von etwa 1 MWd freigesetzt wird (s. S. 135).
Durch die nicht gleichmäßige Neutronenflußverteilung werden in der Spaltzone einige Gebiete stärker belastet als andere. Deshalb wird meist so vorgegangen, daß man die schwächer belasteten Bereiche im Reaktor beläßt, sie nach einem berechenbaren Schema umsetzt und nur die am stärksten »abgebrannten« Brennstoffteile gegen neue austauscht. Wenn auf diese Weise die notwendige Menge an Reservebrennstoff für die geplante nächste Betriebsperiode zusammengekommen ist, kann der Reaktor wieder in Betrieb genommen werden.

Aufarbeitung des verbrauchten Brennstoffs

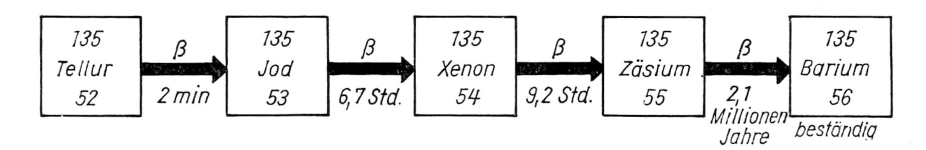
Die herausgenommenen Brennstoffteile können einer chemischen Aufarbeitung zugeführt werden, bei der die den Reaktorbetrieb störenden Stoffe abgetrennt werden. Diese Verfahren erfordern wegen der starken Radioaktivität des Materials besondere Techniken und Schutzmaßnahmen. Das bei diesen Prozessen gewonnene Spaltmaterial wird zu neuen Brennstoffeinheiten zusammengesetzt und wieder in einen Kernreaktor eingeladen.
Die gasförmigen Spaltprodukte und die bei den hohen Temperaturen in den Brennstoffteilen teilweise flüchtigen festen Spaltprodukte dürfen wegen der starken Radioaktivität nur in geringstmöglichem Umfang bis zu festgelegten Grenzwerten die Reaktoranlage verlassen. Das wird durch mehrfach ausgelegte Schutzsysteme gewährleistet (s. S. 219). So gibt es im Kernkraftwerk Feuer, also Wärmeerzeugung ohne Rauch. Das ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber den Kohlekraftwerken, die besonders durch den Kohlendioxid- und Schwefelgehalt der Abgase die Umwelt stark belasten.

Xenonvergiftung

Wir sind bisher davon ausgegangen, daß ein Kernreaktor über längere Zeit mit gleichmäßiger Leistung betrieben wird. Das sind ideale Bedingungen, die in der Praxis nicht immer gewährleistet sein werden. Es können sich z. B. aus irgendwelchen Gründen kurzzeitige Abschaltungen notwendig machen.

Lastwechsel

Außerdem ist damit zu rechnen, daß die Reaktorleistung an den mit der Tages- und Jahreszeit wechselnden Bedarf angeglichen werden muß. Das wird öfter der Fall sein, wenn die Kernkraftwerke einen wesentlichen Anteil der gesamten Energieerzeugung bestreiten. In diesen Situationen ist eine Eigenheit der thermischen Kernreaktoren zu berücksichtigen, die eine ausführliche Analyse der Eigenschaften der Spaltprodukte notwendig macht.



84 Beispiel einer Betazerfallskette der Spaltprodukte
β Aussendung eines Betateilchens

Unter den Spaltprodukten gibt es Atome von mehr als 30 verschiedenen Elementen. Wie schon erwähnt, ist die Radioaktivität aller dieser Isotope auf den Neutronenüberschuß ihrer Kerne zurückzuführen. Das wollen wir etwas genauer untersuchen.

Zusammensetzung der Spaltprodukte

Bei der Spaltung von Uran 235 gibt es anfangs, einschließlich des auslösenden Neutrons, im Kern insgesamt 92 Protonen und 144 Neutronen. Die Aufteilung dieser Bausteine auf die Spaltbruchstücke ist meistens etwas ungleichmäßig. Am häufigsten treten dabei leichtere Kerne mit der Massenzahl 95 und schwerere mit der Massenzahl 139 auf. Nehmen wir einmal an, dieser wahrscheinlichste Fall wäre eingetreten. Die entsprechenden Ordnungszahlen (gleich Protonenzahlen) sind 38 und 54. Die schwersten stabilen Isotope dieser Art sind Strontium 88 und Xenon 136, die zusammen $(88-38) + (136-54) = 132$ Neutronen enthalten. Da zwei bis drei Neutronen unmittelbar bei der Spaltung frei werden, bleiben für jeden Spaltproduktkern anfangs etwa fünf zusätzliche Neutronen.
Von diesem Ballast befreien sich die Kerne durch einige aufeinanderfolgende Betazerfälle, bei denen jeweils ein Elektron emittiert wird und sich ein Neutron in ein Proton umwandelt. In diesen Zerfallsketten senden nach vorangegangenem Betazerfall einige Kerne auch Neutronen aus, die dadurch zum Spaltungszeitpunkt verzögert auftreten und, wie schon erwähnt, die Möglichkeit der Steuerung der Kettenreaktion erschließen.
Insgesamt führt der radioaktive Zerfall der Spaltprodukte schon nach kurzer Betriebszeit eines Reaktors zum Auftreten von etwa 200 neuen Isotopen. Unter diesen ist ein Störenfried besonderer Art. Das ist Xenon 135 mit einem Wirkungsquerschnitt für thermische Neutronen von immerhin $2{,}7 \cdot 10^{-22}\,m^2$ (2,7 Millionen Barn). Verglichen mit dem Spaltquerschnitt der thermischen Neutronen für Uran 235 von $5{,}82 \cdot 10^{-26} m^2$ (582 Barn) ist das ein außerordentlich hoher Wert. Deshalb wird die störende Wirkung dieses Isotops auf den Neutronenhaushalt zu Recht als Vergiftung des Reaktors bezeichnet.

Vergiftung des Reaktors

Das Xenonisotop entsteht teilweise unmittelbar als Spaltprodukt, teilweise verzögert in einer Betazerfallskette (Bild 84). Das Anfangsglied der Kette, Tellur, tritt mit einem Anteil von etwa 6 % je Spaltung auf und wandelt sich sehr schnell in Jod um. Da Jod nur in geringem Maße Neutronen einfängt, wird die gesamte Abnahme des Jods nur durch seinen radioaktiven Zerfall verursacht.
Wird ein Reaktor einige Zeit mit hinreichend hoher Leistung betrieben, entsteht zuerst relativ schnell eine Menge Jod. Der Xenon-135-Gehalt steigt, durch die Halbwertzeit des Jodzerfalls verzögert, langsam bis zu einem bestimmten Wert an, der in der Folgezeit konstant bleibt. Der Bildung von Xenon 135 als Zerfallsprodukt vom Jod und als unmittelbares Spaltprodukt läuft dabei der Abbau desselben Isotops durch Zerfall in Zäsium und durch den Einfang thermischer Neutronen entgegen. Die sich durch diese gegenläufigen Prozesse nach einigen Stunden einstellende Gleichgewichtskonzentration des Xenon ist jedoch sehr stark vom Neutronenfluß abhängig und spielt deshalb nur in Leistungsreaktoren eine Rolle.
Um den Reaktor in dieser Anfangsperiode immer im kritischen Zustand zu halten, müssen als Ausgleich zur anwachsenden Absorption der Neutronen, die durch das Xenon hervorgerufen wird, die Regelstäbe entsprechend aus dem Reaktor herausgezogen werden.

Bei den Spaltprodukten mit verhältnismäßig kleinen Einfangquerschnitten für Neutronen wird die Gleichgewichtskonzentration infolge des sehr langsamen Anstiegs praktisch nie erreicht, da inzwischen meist aus anderen Gründen die Betriebsperiode des Reaktors beendet wurde.

Überraschung nach dem Abschalten

Einen überraschenden Effekt beobachten wir nach der Abschaltung eines Kernreaktors und auch bei Leistungsabsenkungen. Die Xenonvergiftung nimmt nämlich nach Beendigung des Betriebes noch zu und erreicht für eine bestimmte Zeit so hohe Werte, daß es auch durch vollständiges Herausziehen der Regelstäbe aus der Spaltzone nicht gelingt, diese Vergiftung zu kompensieren und die Anlage erneut in Betrieb zu nehmen.

Dieses Verhalten hat folgende Ursache. Der plötzliche Wegfall der thermischen Neutronen durch das Abschalten des Reaktors stört den bis dahin bestehenden Gleichgewichtszustand hinsichtlich des Xenon 135. Da es bei Betriebsende noch eine ganze Menge Jod im Reaktor gibt, geht durch den radioaktiven Zerfall die Xenonproduktion noch einige Stunden weiter bis der Jodvorrat erschöpft ist. Der Abbau des Xenon erfolgt jetzt allein durch den Betazerfall in Zäsium und verläuft dadurch wesentlich langsamer.

Die Vergiftung erreicht ihren Höchststand nach ungefähr 10 Stunden und klingt erst in etwa 2 Tagen wieder auf den Ausgangswert vom Betriebsende ab. Bei einer unbeabsichtigten oder fehlerhaften Abschaltung muß man deshalb sofort wieder mit dem Betrieb beginnen. Nach einigen Stunden sind alle Versuche vergeblich.

Der Reaktor als Brüter

Das Uranisotop 238 könnte man nach den bisherigen Schilderungen als völlig nutzlos ansehen. Es stört durch Neutroneneinfang den Prozeß im Reaktor, verwandelt sich dabei aber in Uran 239.

Kernsprengstoff aus dem Reaktor

Schon im Sommer 1940 veröffentlichten die amerikanischen Physiker *Mc Millan* und *Abelson* in diesem Zusammenhang eine kurze Notiz über eine höchst bedeutsame Entdeckung. Sie kamen nämlich zu dem Schluß, daß im Reaktor durch radioaktiven Zerfall ein Folgeprodukt von Uran 239 entstehen muß, das nach der Theorie von *Bohr* und *Wheeler* spaltbar ist und sich ebenso wie reines Uran 235 als Sprengstoff für Bomben eignet.

Trotz gewaltigen technischen Aufwands wurde die Nutzung dieser folgenschweren Entdeckung zur Herstellung von Kernwaffen in den USA in den Jahren nach 1942 in Angriff genommen und mit dem Abwurf einer Kernspaltungsbombe auf Nagasaki bis zur letzten schrecklichen Konsequenz verfolgt.

Verantwortung der Wissenschaftler

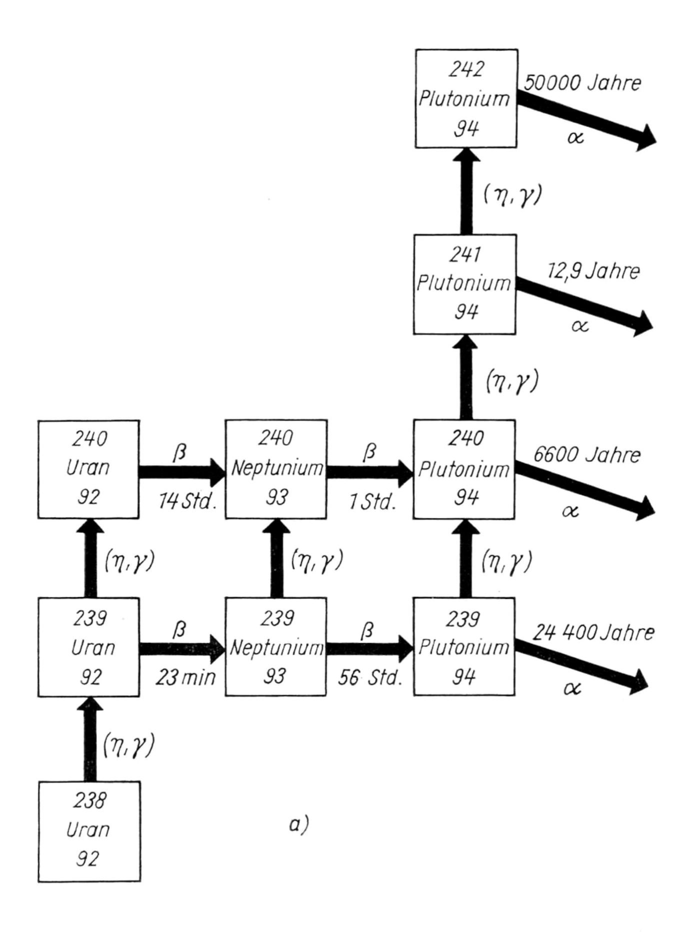
Es ist uns in die Hand gegeben und liegt in der Verantwortung eines jeden auf diesem Gebiet tätigen Wissenschaftlers, alles dafür zu tun, daß dieses spaltbare Material ausschließlich für die Nutzung der Kernenergie zu friedlichen Zwekken eingesetzt wird. Mit der Möglichkeit, in Kernreaktoren als Beigabe zur Energieerzeugung zusätzlich neuen Spaltstoff zu produzieren, haben wir nämlich die einmalige Gelegenheit, die Kernbrennstoffvorräte um ein Vielfaches zu vergrößern. Gehen wir diesen Weg, dann steht der Menschheit damit eine Energiequelle zur Verfügung, die für die nächsten Jahrhunderte eine ausreichende Versorgung gewährleisten könnte.

Entstehung des Plutoniums

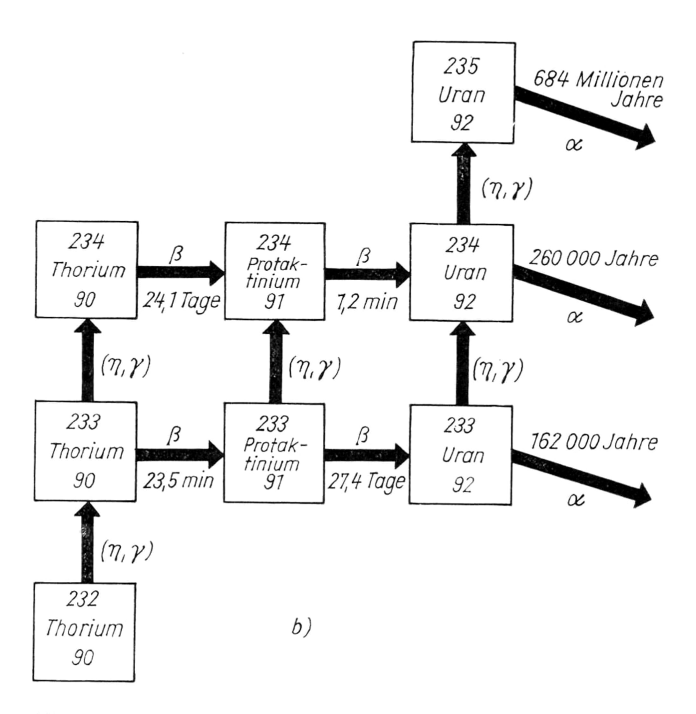
Durch Anlagerung eines Neutrons an einen Uran 238-Kern bildet sich zunächst Uran 239, das sehr kurzlebig ist und sich durch Betazerfall in ein Element mit der Kernladungszahl 93 umwandelt (Bild 85). Nach einem weiteren Betazerfall entsteht dann das spaltbare Isotop mit der Ladungszahl 94.

Transurane

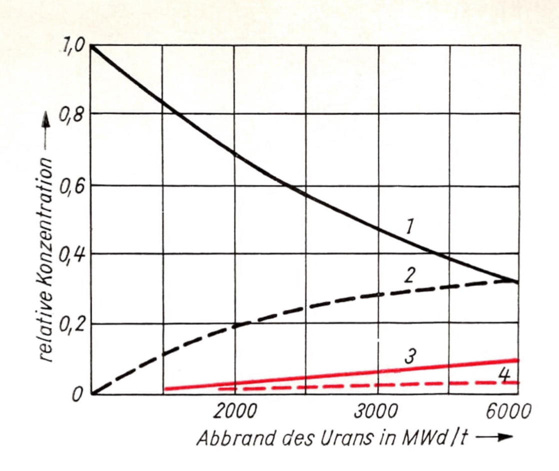
Elemente mit Ladungszahlen, die größer sind als die des Urans (92), gibt es in der Natur nicht. Sie sind nur künstlich durch Kernreaktionen herstellbar und werden Transurane genannt. Die Isotope mit den Ladungszahlen 93 und 94 tragen heute die Bezeichnung Neptunium und Plutonium. Diese Namen


242
Plutonium
94
50000 Jahre
α
(η, γ)
241
Plutonium
94
12,9 Jahre
α
(η, γ)
240
Uran
92
β
14 Std.
240
Neptunium
93
β
1 Std.
240
Plutonium
94
6600 Jahre
α
(η, γ)
(η, γ)
(η, γ)
239
Uran
92
β
23 min
239
Neptunium
93
β
56 Std.
239
Plutonium
94
24 400 Jahre
α
(η, γ)
238
Uran
92

a)


235
Uran
92
684 Millionen Jahre
α
(η, γ)
234
Thorium
90
β
24,1 Tage
234
Protak-
tinium
91
β
1,2 min
234
Uran
92
260 000 Jahre
α
(η, γ)
(η, γ)
(η, γ)
233
Thorium
90
β
23,5 min
233
Protak-
tinium
91
β
27,4 Tage
233
Uran
92
162 000 Jahre
α
(η, γ)
232
Thorium
90

b)



86 Abnahme der Uran- und Zunahme der Plutoniumkonzentration während der Betriebszeit eines Kernreaktors
1 Uran 235; 2 Plutonium 239; 3 Plutonium 240; 4 Plutonium 241

wurden den neuen Elementen von ihrem Entdecker *Seaborg* nach den äußersten Planeten unseres Sonnensystems, Neptun und Pluto, gegeben. Ebenso war das Uran zur Zeit seiner Entdeckung Ende des 18. Jahrhunderts nach dem damals neu entdeckten Planeten Uranus benannt worden.
Vorteilhaft ist, daß sich das Plutonium chemisch vom Uran unterscheidet. Es kann daher mit chemischen Methoden vom Uran abgetrennt werden und bedarf keiner aufwendigen physikalischen Trennverfahren, wie sie bei der Anreicherung des Uran 235 gegenüber dem Uran 238 notwendig sind.

Brutstoff Thorium

Derzeit ist die Bedeutung des Thoriums als Kernbrennstoff noch sehr gering, es zeichnet sich aber eine Entwicklungslinie von Kernreaktoren ab, in denen dieses mindestens ebenso häufig wie Uran vorhandene Element in das spaltbare Isotop Uran 233 verwandelt werden kann. Der Prozeß verläuft ähnlich wie beim Uran 238 (vgl. Bild 85) und ermöglicht eine weitere Vergrößerung der Spaltstoffvorräte.
Die Spaltstoffvorräte in einem Reaktor werden während seiner Betriebszeit ständig durch die Bildung von Plutonium ergänzt. Der negative Einfluß auf die Reaktivität, der von dem ebenso ununterbrochenen Prozeß der Vergiftung und Verschlackung des Systems durch die Spaltprodukte herrührt, wird jedoch nur zum Teil ausgeglichen. In welchem Maße im Laufe der Zeit das »verbrannte« Uran durch Plutoniumisotope ersetzt wird, zeigt Bild 86. Es muß dabei berücksichtigt werden, daß nicht jedes auftreffende Neutron das Plutonium spaltet. Durch aufeinanderfolgende Anlagerungen von Neutronen werden die Plutoniumisotope 240, 241 und 242 gebildet.

Plutoniumfamilie

Während der Wirkungsquerschnitt für die Spaltung bei den geradzahligen Isotopen, ähnlich wie beim Uran 238, erst oberhalb einer Neutronenenergie von 1 MeV, also für schnelle Neutronen deutlich ansteigt, ist Plutonium 241, genauso wie das Isotop 239, im ganzen Energiebereich spaltbar.

◀
85 Brüten von Spaltmaterial aus Uran 238 (a) und Thorium (b)
Kernprozesse:
α Aussendung eines Alphateilchens
β Aussendung eines Betateilchens
(n, γ) Gammastrahlung nach Neutroneneinfang
Die angegebenen Zeiten sind Halbwertzeiten der Prozesse.

Die schnellen Brüter

Sicherlich im Zusammenhang mit Untersuchungen zur Kernspaltungsbombe, genau ist das bisher nicht bekannt geworden, deckte man weitere kernphysikalische Eigenschaften der Uran- und Plutoniumkerne auf. Die konsequente Nutzung dieser Erkenntnisse führte zu einem neuen Konstruktionsprinzip von Reaktoren, das sich sehr gut und vor allem wesentlich besser als die bisherigen Anlagen zum Brüten von neuem Spaltstoff eignen sollte.

Reaktor ohne Moderator

Wenn nämlich bei der Zusammensetzung eines Reaktors auf eine Bremssubstanz wie Wasser oder Graphit verzichtet wird, behalten die bei der Spaltung mit einer mittleren Energie von 1 MeV erzeugten Neutronen relativ hohe Geschwindigkeiten bei. Sie bewegen sich etwa 1000mal schneller als die Neutronen in thermischen Reaktoren. Derartige Systeme nennt man deshalb schnelle Reaktoren oder auch Reaktoren mit einem schnellen Neutronenspektrum.

Problem der Steuerung

Trotz der hohen Geschwindigkeit besteht kein Grund zur Besorgnis hinsichtlich der Sicherheit. Diese Systeme werden nämlich, genauso wie die thermischen Reaktoren, nur mit den von den Spaltprodukten verzögert freigesetzten Neutronen kritisch. Daher ist hier ebenfalls eine Steuerung durch mechanisch bewegte Neutronenfänger möglich.

Vorteile schneller Systeme

Wo liegt denn nun aber der Vorteil der schnellen Systeme? Er wird offensichtlich, wenn wir die Zahl der ausgelösten Spaltungen ins Verhältnis setzen zu der Neutronenzahl, die bei dieser Reaktion und durch Einfang dem Prozeß entzogen wird. Dieses Verhältnis ist für schnelle Neutronen größer als für thermische und zeigt damit insgesamt eine Zunahme der Ausbeute an Spaltneutronen für höhere Neutronengeschwindigkeiten an. Um diese zusätzlichen Neutronen zum Brüten von neuem Spaltmaterial nutzen zu können, begann man sich mit Reaktoren zu beschäftigen, in denen die Kettenreaktion der Kernspaltung ausschließlich mit schnellen Neutronen abläuft.

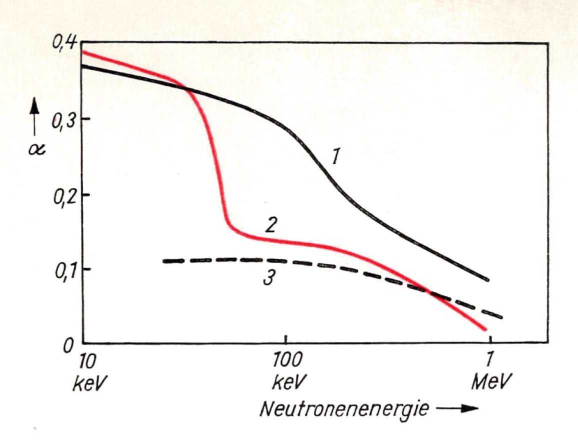
In der Reaktorphysik verwendet man zur mathematischen Beschreibung der Vorgänge das Verhältnis der Wirkungsquerschnitte der Neutronen für Einfang und Spaltung und nennt es α. Bild 87 zeigt, in welchem Maße sich dieser Wert für die Isotope Uran 233, Uran 235 und insbesondere für Plutonium 239 mit steigender Energie verringert. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Neutroneneinfang und Kernspaltung nimmt zwar absolut gesehen ab, jedoch die Wahrscheinlichkeit für den Neutroneneinfang schneller als diejenige für die Spaltung. Dadurch kommt es zu dieser relativ günstigen Bedingung für die Neutronenvermehrung, was durch kleinere Werte von α ausgedrückt wird.

Hinzu kommt, daß die Zahl der freigesetzten Neutronen je Spaltung mit steigender Neutronenenergie etwas zunimmt. Dadurch wird die Zahl der Neutronen, die beim Einfang eines Neutrons in einem spaltbaren Kern im Mittel freigesetzt werden, noch weiter vergrößert. In Bild 88 erkennt man die starke Abhängigkeit der Werte von der Energie der Neutronen und außerdem, daß sich Plutonium am besten als Brennstoff für schnelle Brutreaktoren eignet.

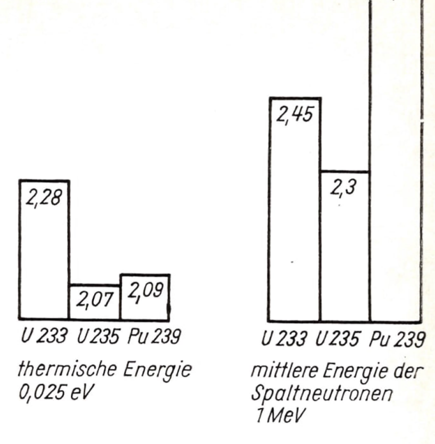
Spaltung durch schnelle Neutronen

Eine zusätzliche Verbesserung des Brutvermögens tritt durch die Tatsache ein, daß im Energiebereich oberhalb etwa 1 MeV auch die Isotope Thorium 232, Uran 238 (Bild 89), Plutonium 240 und Plutonium 242 spaltbar sind. Dadurch wird die Neutronenausbeute des gesamten Systems noch um einen Faktor 1,1 bis 1,3 erhöht.

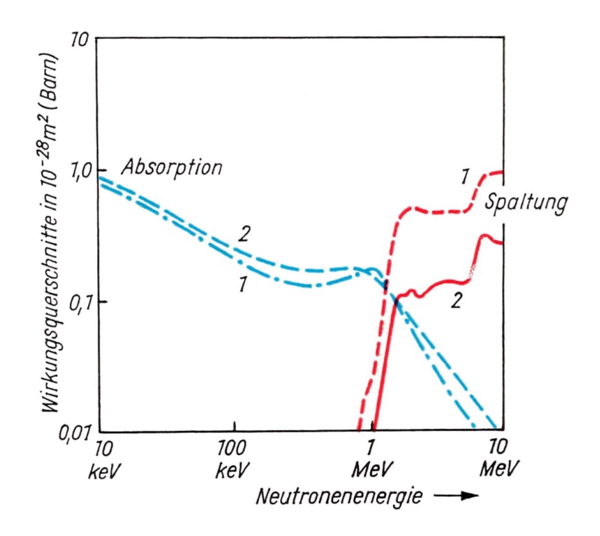
Im Idealfall eines Plutoniumsystems mit Brutstoff erhält man Neutronenausbeuten von etwa 3,5. Wird berücksichtigt, daß wiederum ein Neutron für die weitere Kettenreaktion notwendig ist, bleiben immerhin 2,5 Neutronen übrig. Solche Werte wurden experimentell zuerst durch die Analyse der Spaltprodukte von Kernexplosionen und später an kleinen schnellen Versuchsreaktoren nachgewiesen.



87 α-Verhältnis aus der Neutronenzahl, die der Kettenreaktion durch Einfang entzogen wird, und der Zahl der dabei ausgelösten Kernspaltungen in Abhängigkeit von der Neutronenenergie. Kleinere α-Werte zeigen eine höhere Ausbeute an Kernspaltungen an. 1 Uran 235; 2 Plutonium 239; 3 Uran 233



88 Zahl der Neutronen, die beim Einfang eines Neutrons in einem spaltbaren Kern im Mittel freigesetzt werden



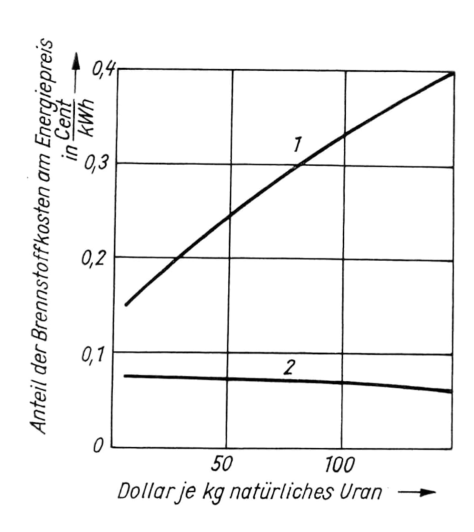
89 Wahrscheinlichkeiten für die neutroneninduzierte Kernspaltung und den Neutroneneinfang, dargestellt als Wirkungsquerschnitte für Brutmaterialien in Abhängigkeit von der Neutronenenergie
1 Uran 238;
2 Thorium 232

Reale Systeme

In großen Systemen sind aus technischen und ökonomischen Gründen einige Kompromisse nicht zu umgehen, durch die der zum Brüten verwendbare Überschuß bisher auf 1,3 bis 1,5 Neutronen verringert wird. Die Reaktorphysiker bemühen sich um eine Erhöhung dieser Werte und sind auf jedes Zehntel stolz. Ein Überschuß von 1,3 bis 1,5 Neutronen bedeutet nämlich, daß in einem schnellen Reaktor 1 kg verbrauchtes Plutonium durch 1,3 bis 1,5 kg neu erzeugtes Plutonium ersetzt wird. Es wird also nicht nur dieselbe Menge wiedererzeugt, die verbraucht wird, sondern zusätzlich 0,3 bis 0,5 kg Plutonium, die für einen neuen Reaktor verwendet werden können.
Daraus lassen sich zwei Schlußfolgerungen ziehen:

Brennstoffkosten

1. Bei schnellen Reaktoren ist mit geringeren Brennstoffkosten als in einem beliebigen thermischen Reaktor zu rechnen, da mehr Plutonium erzeugt werden kann, als der Reaktor verbraucht.



90 Zusammenhang zwischen Brennstoffkosten und Preis des natürlichen Urans
1 Druckwasserreaktoren; 2 schnelle Reaktoren

2. In schnellen Reaktoren kann auch teurer Brennstoff verwendet werden, da wiederum teures Plutonium für weitere schnelle Reaktoren erzeugt wird. Das interessiert insbesondere in den nächsten Jahrzehnten, solange der Plutoniumpreis noch vom Uranpreis abhängt.

Tempo des Brütens

Wenn soviel schnelle Brüter in Betrieb sind, daß sie die Energiewirtschaft bestimmen, wird der Plutoniumpreis nicht mehr vom Uranpreis abhängen, sondern ausschließlich durch die Bedürfnisse der schnellen Brüter bestimmt werden.
Der Anteil der Brennstoffkosten am Energiepreis in Abhängigkeit vom Uranpreis ist in Bild 90 dargestellt. Die Überlegenheit der schnellen Brüter gegenüber den thermischen Reaktoren in dieser Hinsicht ist deutlich zu erkennen.
Wenn mehr Plutonium erzeugt als verbraucht wird, kommt man desto eher zu zusätzlichem Plutonium, je schneller das eingesetzte Plutonium verbraucht ist. Das ist einer der Gründe dafür, daß für die schnellen Reaktoren zur Verbesserung der Effektivität eine möglichst hohe spezifische Leistung (Energieerzeugung je Masseeinheit des Brennstoffs) in der Spaltzone angestrebt werden muß.

Verdopplungszeit

Als Maß für das Tempo des Brütens wird die sogenannte Verdopplungszeit verwendet, das ist die Zeit, in der ein Reaktor soviel Spaltstoff zusätzlich erzeugt hat, daß ein gleich großer neuer Reaktor damit beschickt werden kann und dieser Spaltstoff für den neuerlichen Einsatz aufgearbeitet worden ist.
In die Verdopplungszeit geht also die gesamte Zeit für den Brennstoffzyklus ein. Sie setzt sich zusammen aus der Aufenthaltszeit im Reaktor, der Zeit für die Entladung des Brennstoffs, für den Transport zur Fabrik für die Wiederaufarbeitung, für den chemischen Prozeß der Aufarbeitung und der Herstellung neuer Brennstoffstäbe bis zu ihrer neuerlichen Verwendung im Reaktor.

Vergrößerung der Brennstoffvorräte

Es ist eine sehr lohnende Aufgabe, sich um eine Verkürzung aller dieser Prozesse zu bemühen, denn insgesamt kann durch das Brüten in den schnellen Reaktoren fast das gesamte Uran ausgenutzt werden, während der Ausnutzungsgrad bei thermischen Reaktoren nur zwischen 0,5 bis 2% liegt. Je erzeugter Energieeinheit wird demnach in schnellen Systemen wesentlich weniger Uran benötigt und auch aus diesem Grunde der ökonomische Einsatz von teuerem Uran aus ärmeren Uranerzen ermöglicht. Das hat für den Abbau von Uranvorkommen ungeahnte Konsequenzen. Auch Funde mit geringem Urangehalt sind dann wirtschaftlich noch abbauwürdig. Dadurch werden die verwertbaren Uranvorräte um 2 bis 3 Größenordnungen erhöht und die Energie-

basis der Welt für mindestens ein Jahrhundert gesichert. Um dieses Ziel zu erreichen, bilden seit mehr als einem Jahrzehnt die schnellen Brutreaktoren den Schwerpunkt der Weiterentwicklung fortgeschrittener Kernenergieanlagen in den großen Industrieländern.

Besonderheiten der schnellen Reaktoren

Große kritische Masse

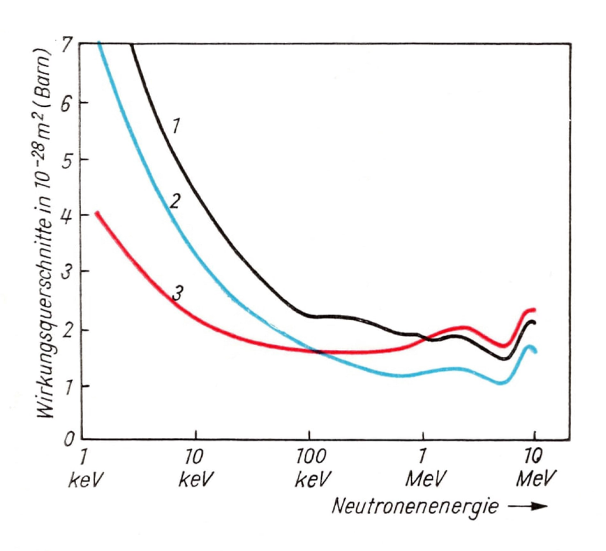
Dem Vorteil der höheren Neutronenausbeute im schnellen Energiebereich steht aber der Nachteil gegenüber, daß hier die Wirkungsquerschnitte für die Spaltung nur ein Zehntel bis zu einem Hundertstel der Werte im thermischen Bereich betragen (Bild 91). Die geringere Wechselwirkung der Neutronen mit den spaltbaren Atomen muß durch mehr Spaltmaterial, also eine größere kritische Masse bei gleichem Volumen, ausgeglichen werden.
Die Wahrscheinlichkeit für den Neutroneneinfang durch das Brutmaterial Thorium 232 oder Uran 238 ist zwar im ganzen Energiebereich geringer als die Wahrscheinlichkeit für die Spaltung der Brennstoffkerne, erreicht aber vergleichbare Werte. Um trotzdem den kritischen Zustand des Reaktors zu erreichen, benötigt man wesentlich mehr Spaltstoff als beim thermischen Reaktor.

Hohe Brennstoffanreicherung

Deshalb muß in schnellen Brütern die Dichte des Spaltstoffs hoch sein. Das kann z. B. durch eine Anreicherung des Urans 235 gegenüber dem Uran 238 erreicht werden.
Durch das Fehlen des Moderators wird der Aufbau der Spaltzone viel kompakter. Sie enthält außer dem Brennstoff nur das Kühlmittel. Die Folge davon ist, daß im gleichen Volumen wesentlich mehr Wärmeenergie erzeugt wird. Das erfordert ein sehr wirksames Kühlmittel mit guter Wärmeleitfähigkeit, das auch durch intensive Strahlung nicht angegriffen wird. Außerdem sind Stoffe mit leichten Atomen ungeeignet, die ja die Neutronen verlangsamen würden.

Kühlung mit flüssigem Metall

Man kann zwar Gas oder Dampf einsetzen, doch vorzugsweise wird bei den hohen Temperaturen Natrium verwendet, das ab 97 °C flüssig ist und nach Einschaltung von Wärmetauschern den Anschluß moderner Turbinensätze mit hohen thermischen Wirkungsgraden ermöglicht. Es wird um etwa 200 K im Reaktor erwärmt und tritt mit über 500 °C aus dem Reaktor heraus. Natrium ist jedoch chemisch äußerst reaktionsfähig. Es oxydiert rasch an der Luft und fängt bei Berührung mit Wasser unter heftiger Wärmeentwicklung sogar zu brennen an. Deshalb werden an die Wärmetauscher besonders hohe Anforderungen hinsichtlich der Dichtheit gestellt.



91 Energieabhängigkeit der Wirkungsquerschnitte für die Kernspaltung
1 Uran 233; 2 Uran 235; 3 Plutonium 239

Die geringere Wechselwirkung der schnellen Neutronen mit dem Reaktormaterial wird nur teilweise durch die Anreicherung des Spaltstoffes ausgeglichen.

Äußerer Brutmantel

Es verlassen trotzdem noch mehr Neutronen die Spaltzone als beim thermischen Reaktor. Der die Spaltzone umschließende Teil wird deshalb aus Brutmaterial Uran 238 und Thorium 232 aufgebaut, das teilweise die herausfliegenden Neutronen in die Spaltzone zurückstreut und teilweise einfängt. Neuer Spaltstoff in Form von Plutonium 239 und Uran 233 wird auf diese Weise sowohl in als auch außerhalb der aktiven Zone erzeugt. Für den Brutmantel kann vorteilhaft der bei der Isotopentrennung in großen Mengen anfallende Abfall eingesetzt werden, der vorwiegend Uran 238 und nur etwa 0,3 % Uran 235 enthält.

Keine Vergiftung durch Spaltprodukte

Bei den thermischen Reaktoren beschränkt die Vergiftung durch Spaltprodukte die Aufenthaltszeit des Brennstoffs im Reaktor. Neutronen mit hohen Energien werden jedoch nur in geringem Maße von den Spaltprodukten eingefangen, auch gibt es keine großen Einfangresonanzen, wie sie bei niedrigen Energien auftreten. Deshalb wird in schnellen Reaktoren der Neutronenhaushalt durch die Spaltprodukte kaum beeinflußt, wie es im thermischen Reaktor, insbesondere durch Xenon und Samarium, der Fall ist. Das ist sehr vorteilhaft hinsichtlich der Neutronenökonomie während der Reaktorbetriebszeit. Der Brennstoff kann dadurch stärker abgebrannt bzw. bis zu einem höheren Grade ausgenutzt werden und muß erst dann aus dem Reaktor herausgenommen werden, wenn die Gefahr von Materialschäden durch Bestrahlung besteht. Diese schon recht günstigen Verhältnisse werden noch durch die guten Bruteigenschaften des schnellen Reaktors verbessert. Während der Betriebszeit wird dadurch mehr Spaltstoff als im thermischen Reaktor zum Ausgleich der Reaktivitätsbilanz neu erzeugt. Beim gegenwärtigen Entwicklungsstand der schnellen Reaktoren liegt der Abbrand in der Größenordnung von 100000 MWd je Tonne Spaltmaterial, also etwa dreimal höher als beim Druckwasserreaktor.

Möglichkeiten der Regelung

Die Steuerung des schnellen Reaktors beruht genauso wie die des thermischen auf der Existenz der verzögerten Neutronen. Es gibt jedoch als Material für die Steuerstäbe keine starken Absorber für die schnellen Neutronen. Dünne Stäbe, wie bei thermischen Systemen, wären aus diesem Grunde hier wenig wirksam.

Kleine schnelle Reaktoren, die wegen der großen freien Weglänge der Neutronen große Neutronenverluste aus der Spaltzone aufweisen, kann man durch Veränderung des Reflektors regeln. In mittelgroßen Reaktoren werden Brennstoffkassetten zusätzlich zu Absorberstäben aus Bor bewegt. In großen Reaktoren mit relativ geringen Oberflächenverlusten werden Absorberstäbe aus Tantal oder Bor bevorzugt, obwohl ihr Absorptionsvermögen nicht besonders groß ist.

Betriebssicherheit

Plutoniumproblem

Argumente, die gegen die Brüter ins Feld geführt werden, sind die Plutoniumerzeugung und ein bombenartiges Verhalten im überkritischen Zustand. Wir hatten schon erkannt, daß Plutonium durch jedes Reaktorsystem erzeugt wird und keine Besonderheit der schnellen Brüter ist (s. S. 149). Der Transport und die Aufarbeitung des verbrauchten Kernbrennstoffs müssen also gleichermaßen sorgfältig und bei hoher Sicherheit gegen innere Betriebsstörungen und gewaltsame äußere Einwirkung erfolgen.

Inhärente Sicherheit

Etwas eingehender wollen wir uns mit der Frage der inhärenten Sicherheit des schnellen Reaktors beschäftigen, da hier die Verhältnisse anders liegen als in Systemen mit Moderator. In den letztgenannten Anordnungen bewirkt eine Temperaturerhöhung des Kühlmittels, das gleichzeitig auch als Neutronenbremsmittel fungiert, in jedem Fall einen negativen Reaktivitätseffekt. Das bedeutet einen ungünstigen Einfluß auf den Neutronenhaushalt in dem Sinne,

daß dadurch der Reaktor, je nach der Größe des Effekts, unterkritisch wird. Aber auch der schnelle Brüter ist ebensowenig eine Atombombe wie jeder andere Kernreaktor.

Kühlmittelverlust

In der ersten Generation der Brüter wird vorwiegend Natrium als Kühlmittel verwendet. Deshalb müssen wir uns mit der Wechselwirkung zwischen Natrium und Neutronen beschäftigen, wenn wir die Folgen eines Kühlmittelverlustes in einem kritischen System kennenlernen wollen. Interessant sind dabei solche Fälle, in denen durch höhere Temperaturen und damit verbundener Volumenvergrößerung das Natrium teilweise aus der Spaltzone verdrängt wird. Damit rechnet man beim Normalbetrieb eines schnellen Reaktors immer und stellt sich darauf ein. Als direkte Betriebsstörung ist jedoch anzusehen, wenn durch Verstopfung eines Kühlkanals Natrium verdampft und der Dampf das Natrium aus dem restlichen Teil des Kanals drückt. Beide Male nimmt die Dichte des Kühlmittels in der Spaltzone ab. Dadurch wird auch der Neutronenhaushalt beeinflußt. Die Wirkung setzt sich aus unterschiedlichen und gegenläufigen Effekten zusammen.

Es ergibt sich ein kleiner positiver Reaktivitätseffekt, also eine Verbesserung der Lage im Neutronenhaushalt durch Verringerung des Neutroneneinfangs im Natrium. Des weiteren werden die Neutronen wegen der niedrigeren Dichte in geringerem Maße durch das Natrium elastisch und inelastisch gestreut, dadurch verschiebt sich die mittlere Neutronenenergie zu höheren Werten. Dies begünstigt aus verschiedenen Gründen die Vermehrung der Neutronen. Bei den Elementen Thorium 232, Uran 238, Plutonium 240 und Plutonium 242, die erst oberhalb eines bestimmten Energiewertes der auslösenden Neutronen (Schwellwert) spaltbar sind, tritt diese Reaktion häufiger ein. Im brutfähigen Material Uran 238, Thorium 232 und bis zu einem gewissen Grade auch in den Strukturmaterialien werden weniger Neutronen eingefangen. Außerdem wird das Verhältnis Einfang zu Spaltung (α) bei Plutonium 239, Plutonium 241, Uran 235 und Uran 233 kleiner für höhere Energien (s. Bild 87).

Höhere mittlere Neutronenenergie

Die Größe des beschriebenen Effektes hängt ab von der Zusammensetzung des Systems und der chemischen Verbindung, in der die Materialien vorhanden sind, ob als Metalle, Oxide oder Karbide. Durch eine geeignete Auswahl kann die positive Gesamtwirkung sehr klein gehalten werden.

Oberflächenverluste

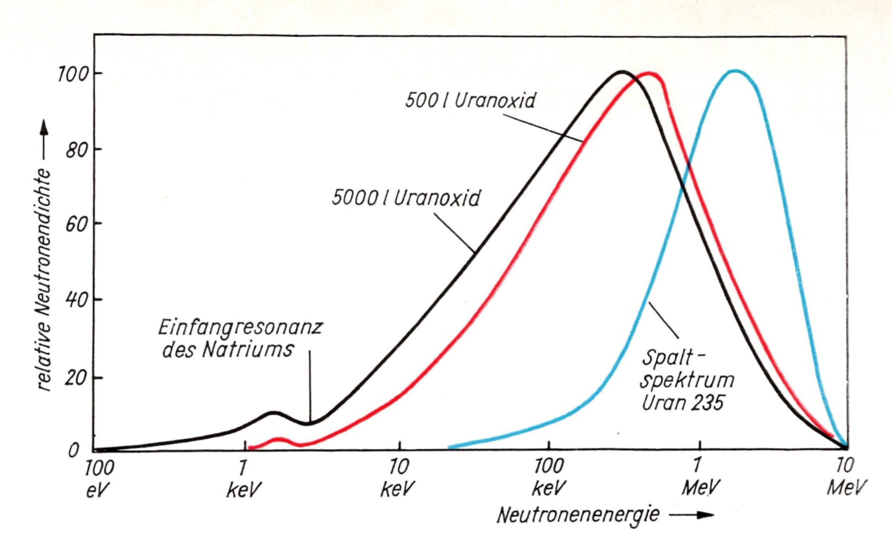
Gegenläufig zu den beiden erstgenannten Effekten wirkt der Umstand, daß bei höheren Neutronenenergien und damit verbundenen größeren freien Weglängen mehr Neutronen das System durch die Oberfläche verlassen. Das passiert um so häufiger, je größer der Volumenanteil des Natriums in der Spaltzone ist oder wenn der Reaktor so gestaltet wird, daß der Neutronenverlust durch die Oberfläche verhältnismäßig groß ist. Bei geringer Höhe und großem Durchmesser der Spaltzone ist das z. B. der Fall. Die Verluste werden jedoch im Verhältnis zur Gesamtzahl der vorhandenen Neutronen geringer, je größer die Spaltzone ist. Dieser Effekt überwiegt bei kleinen und mittelgroßen Reaktoren, so daß die Gesamtwirkung des Natriumverlustes auf den Neutronenhaushalt negativ ist. Das gleiche kann für größere Systeme nur bei geeigneter Zusammensetzung und entsprechender Formgebung erreicht werden.

Wie sich insgesamt herausgestellt hat, ist der Einfluß des Natriumverlustes auf die Neutronenökonomie so stark, daß dies der wichtigste physikalische Faktor ist, der im Zusammenhang mit der Konstruktion von großen, schnellen Leistungsreaktoren eine Rolle spielt.

Dopplereffekt

In den letzten Jahren sind sehr viele Untersuchungen zum sogenannten Dopplerkoeffizienten an schnellen Systemen durchgeführt worden. Die große Rolle dieses Koeffizienten liegt in seiner Bedeutung als Widerpart zu einem möglichen positiven Reaktivitätseffekt durch Natriumverlust in sehr großen schnellen Reaktoren und beruht auf folgenden Vorgängen:

Die Wirkungsquerschnitte einiger Kerne für Einfang und Spaltung weisen für bestimmte Energien sehr hohe Werte auf, die Resonanzen genannt werden.



92 Neutronenspektren in typischen mittleren und großen schnellen Reaktoren

Selbstabschirmung

Treffen Neutronen mit dieser Resonanzenergie auf derartige Kerne, reagieren sie mit großer Wahrscheinlichkeit schon im ersten Teil des durchdrungenen Volumens. Weiter hinten liegende, gleichartige Kerne sind dadurch abgeschirmt und bleiben unberührt. Man spricht in diesem Fall von einer Selbstabschirmung.

Bei höheren Temperaturen verändert sich die relative Geschwindigkeit der Neutronen gegenüber den Kernen in der Spaltzone. Infolgedessen tritt eine sogenannte Dopplerverbreiterung der Resonanzwerte ein, wie sie für thermische Reaktoren auch schon beschrieben wurde (s. S. 143). Die Reaktionsraten wachsen bei höheren Temperaturen durch eine verminderte Selbstabschirmung an. Das hat auf den Neutronenhaushalt einen positiven Einfluß, wenn es sich um Spaltungsresonanzen, einen negativen Einfluß, wenn es sich um Einfangresonanzen handelt.

Bei hohen Neutronenenergien sind die Resonanzen schwach ausgeprägt und überlappen sich gegenseitig. Daher ist der Dopplereffekt nur für niederenergetische Neutronen unterhalb etwa 10 keV von Bedeutung. Derartige Neutronen sind besonders in großen schnellen Reaktoren vorhanden (Bild 92).

Temperaturkoeffizient

Im Laufe der Betriebszeit eines Reaktors ändert sich die Isotopenzusammensetzung des Brennstoffs und damit sein Temperaturverhalten. Alle genannten Effekte wirken in komplizierter Weise teilweise in der gleichen Richtung, teilweise gegeneinander. Deshalb wird den Untersuchungen hinsichtlich der Temperaturkoeffizienten für den geplanten Aufbau großer und ökonomisch günstiger schneller Reaktoren größte Aufmerksamkeit gewidmet.

Damit soll erreicht werden, daß jedes für den Betrieb freigegebene System einen insgesamt negativen Temperaturkoeffizienten aufweist, also selbstregulierende Eigenschaften hat.

Schmelzen der Brennstoffe

Da ein schneller Reaktor sehr viel Brennstoff enthält, könnte im Havariefall durch teilweises oder vollständiges Schmelzen der Spaltzone das Spaltmaterial sich an anderen Stellen der Anlage zu einer überkritischen Masse sammeln. Dieser Gefahr muß durch spezielle, temperaturfeste Konstruktionselemente begegnet werden. Durch das Vorhandensein von Spaltprodukten wird die Wahrscheinlichkeit für die Formierung einer kritischen Masse stark vermindert.

Forderungen an einen Kernreaktor

Zusammenfassung

Da uns jetzt alle wesentlichen Erscheinungen im Zusammenhang mit der Kettenreaktion der Kernspaltung bekannt sind, können wir die Kriterien für die Konstruktion und Funktion eines Kernreaktors zusammenfassend darstellen. In derartigen Anlagen muß demnach folgendes gewährleistet sein, damit ein sicherer und gefahrloser Betrieb garantiert werden kann:

- die selbständige und stabile Aufrechterhaltung der Kettenreaktion der Kernspaltung sowie deren Steuerbarkeit,
- die Rückhaltung der Spaltprodukte in der Reaktoranlage,
- die Kühlung der Spaltzone und die Abführung der Nachwärme bei plötzlicher Abschaltung der gesamten Anlage,
- die sichere Funktion der Überwachungssysteme.

Wir werden gemeinsam überprüfen, inwieweit diese Forderungen bei den zur Diskussion stehenden Typen von Leistungsreaktoren erfüllt werden.



Energie aus Kernkraftwerken

Großindustrielle Kernspaltung

Die Kernspaltung ist für uns deshalb so interessant und nützlich, weil bei dieser Reaktion Energie frei wird und es möglich ist, eine sich selbsterhaltende Kettenreaktion einzurichten. Der erste Schritt zur Nutzung dieser Kernenergie war, diesen Vorgang in experimentellen Anlagen zu beherrschen. Mit den dabei gewonnenen Kenntnissen ausgerüstet, standen die Physiker und mit ihnen die Forscher vieler weiterer Fachgebiete aber erst am Anfang des noch weit schwierigeren Weges, den Prozeß der Kernspaltung im großindustriellen Maßstab zu verwirklichen. Wir wollen sie auf diesem Weg ein Stück begleiten und dann einen Blick in die Zukunft tun.

Nutzung der Wärme

Durch Neutroneneinfang werden die Kerne des Urans und des Plutoniums gespalten. Die Spaltbruchstücke, die Kerne leichterer Atome sind, haben eine enorme Bewegungsenergie. Durch Stöße mit den benachbarten Atomen werden sie abgebremst und erwärmen dadurch die Substanz des Kernreaktors. Diese Wärme muß aus der Anlage herausgeführt werden und ist dann direkt zur Heizung und als Prozeßwärme oder mit Hilfe von Turbinen zur Stromerzeugung nutzbar.

Probleme der Konstruktion

Bei der Konstruktion von Kernreaktoren muß man sich folgende Fragen vorlegen: In welcher stofflichen Form und in welcher räumlichen Aufteilung ordnet man den Kernbrennstoff an und erreicht dabei eine sichere Betriebsführung? Welches Kühlmittel fängt wenig Neutronen ein, bremst in thermischen Systemen gleichzeitig die Neutronen innerhalb weniger Stöße auf langsame Geschwindigkeiten ab und weist gute wärmetechnische Parameter auf? Der Phantasie der Forscher werden zwar durch die technischen Möglichkeiten starke Beschränkungen auferlegt, es ist aber überraschend, wieviel unterschiedliche Ausführungen es trotzdem gibt. Dabei muß natürlich beachtet werden, welche Entwicklungen zu dem Ziel führen, eine ökonomisch günstige Lösung zu finden, die eine Konkurrenz zur Energieerzeugung auf der Basis von fossilen Brennstoffen darstellt. Diese Motivierung vermittelte der Forschung die notwendige materielle Basis und gab auch anderen Industriezweigen Impulse, sich auf die besonderen Bedingungen der Kernenergietechnik einzustellen.

Ökonomische Lösung gesucht

Erste Kraftwerke

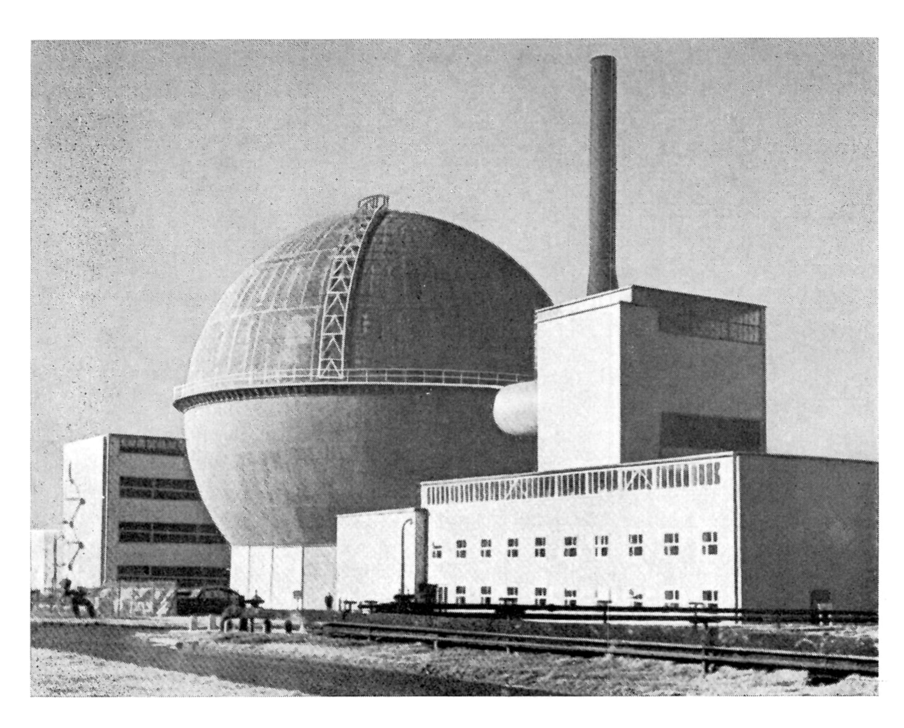
Der Veteran

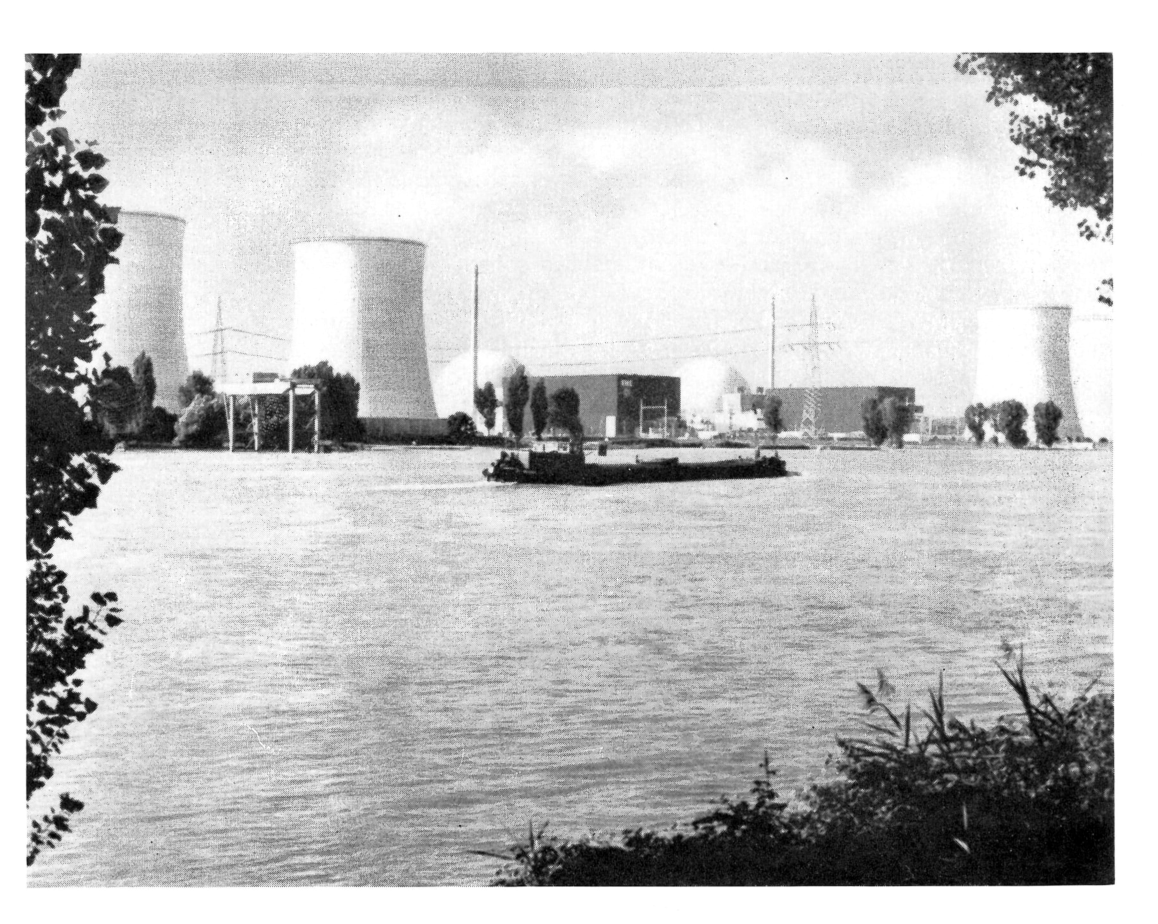
Im Jahre 1954 wurde in der Sowjetunion bei Obninsk das erste Kernkraftwerk der Welt in Betrieb genommen. Es erreicht eine elektrische Leistung von 5 MW. In einen Graphitblock, der den Moderator darstellte, waren 128 Röhrenelemente mit Kernbrennstoff eingebettet, in denen Druckwasser zur Kühlung zirkulierte. Der Bericht über diesen Erfolg erregte 1955 auf der ersten Genfer Konferenz für die friedliche Anwendung der Kernenergie beträchtliches Aufsehen. Nach drei Jahren, zur zweiten Genfer Konferenz, gab es schon drei weitere Leistungsreaktoren. Eine weitere sowjetische Anordnung mit 100 MW elektrischer Leistung, MW(el), von der gleichen Bauweise wie der Reaktor in Obninsk, war als erste Ausbaustufe einer größeren Anlage in Belojarsk in Betrieb genommen worden. In den USA existierte in Shippingport ein Reaktor mit 60 MW(el), bei dem sich die gesamte Spaltzone – mit Wasser als Moderator und als Kühlmittel – in einem großen Druckkessel befand. In Großbritannien hatte man einen anderen Weg gewählt. Mit 4 graphitmoderierten, gasgekühlten Reaktoren mit Natururan als Brennstoff kam die Anlage in Calder Hall auf eine Leistung von 150 MW(el).

Drei Lösungswege bevorzugt

So waren von Anfang an die drei wesentlichen, auch heute noch verfolgten Lösungswege vertreten, bei denen Graphit oder Wasser als Moderator und Wasser oder Gas als Kühlmittel verwendet werden. Eine andere Kühltechnik hatte man zuerst im Kernforschungszentrum Argonne bei Chikago verfolgt. 1956 nahm man dort eine kleine Anlage und 1960 das Kernkraftwerk Dresden mit 180 MW(el) in Betrieb. Neu daran war, daß das Kühlwasser nur unter geringem Druck stand und daß außerdem das Sieden des Wassers in der Spaltzone zugelassen wurde. Das erzeugte Wasser-Dampf-Gemisch kann nach Abscheiden des Wassers als trockener Sattdampf direkt Turbinen zugeleitet und auf den Wärmeaustauscher und die Trennung zwischen Kühlkreislauf und Turbinen-

93 Brutreaktor von Dounreay (Großbritannien)





94 Gesamtansicht des Kernkraftwerkes Biblis am Rhein (BRD). Block A (links) hat einen 1200-MW(el)-Druckwasserreaktor, Block B einen 1300-MW(el)-Druckwasserreaktor

kreislauf verzichtet werden. Darin liegt der Vorteil gegenüber dem Druckwasserreaktor.

In der ersten Zeit der Reaktorentwicklung setzten viele Forscher große Hoffnungen auf das Schwerwasser als Moderator. Um den Besitz und die Produktion des teuren und schwer herzustellenden Stoffes spielten sich während des zweiten Weltkrieges dramatische Auseinandersetzungen ab. Heute wird es im wesentlichen nur noch in Kanada und Indien als Moderator eingesetzt. Wegen der guten Neutronenökonomie solcher Anlagen verfolgt man in diesen Ländern das Ziel, die beträchtlichen Natururanvorkommen direkt und ohne zusätzliche Anreicherungsanlagen zu verbrauchen.

Neue Variante

Seit Dezember 1949 existiert in den USA ein völlig neuartiger Reaktortyp. Sein Name EBR I bedeutet erster experimenteller Brutreaktor. Mit hoher Leistungsdichte in der Spaltzone, flüssigem Metall als Kühlmittel und der Möglichkeit aus nichtspaltbarem Material Spaltstoff zu »erbrüten«, empfiehlt sich dieser Reaktortyp für Kernkraftwerke der Zukunft. Der erste schnelle Brüter mit größerer Wärmeleistung (60 MW) wurde im November 1959 in Dounreay in Großbritannien kritisch (Bild 93).

Aus der Vielfalt der heute in Betrieb und im Bau befindlichen Leistungsreaktoren wird deutlich, daß bisher noch nicht der ideale Typ gefunden wurde, der alle Aufgaben löst. Mit großer Wahrscheinlichkeit wird es auch in Zukunft nicht einen

idealen Mehrzweckreaktor geben. Es zeichnet sich vielmehr ab, daß eine Kombination verschiedener Typen eine günstige Lösung, insbesondere hinsichtlich der vollständigen Nutzung der Kernbrennstoffvorräte, darstellt.

Industrieller Durchbruch

Den industriellen Durchbruch gegenüber konventionellen Verfahren für die Stromerzeugung hat heute der Druckwasserreaktor auf Grund seiner sicheren Betriebsführung, zuverlässigen nuklearen Sicherheit und hohen Verfügbarkeit erreicht. Nachteilig bleibt der relativ niedrige Grad der Ausnutzung der zugeführten Kernbrennstoffe (Bild 94).
Größere Anlagen existieren auch vom Siedewasser- und Druckröhrenreaktor. Interessante Weiterentwicklungen mit neuartigen Lösungen, die Kühlmitteltemperaturen bis nahezu 1000 °C zulassen, gibt es vom gasgekühlten Reaktor. Obwohl es auch schon einige industrielle Anlagen vom Typ des schnellen Brüters gibt, geht hier die Entwicklung noch etwas zögernd voran und bietet für die Forschung noch ein weites Betätigungsfeld.

Zukunft der Kernenergie

Wir werden die Baulinien des Druckwasserreaktors, des gasgekühlten Hochtemperaturreaktors und des schnellen Brüters ausführlich betrachten, um zu erkennen, welcher Stand bisher erreicht wurde und welcher Weg noch vor uns liegt, bis die Kernenergie als zuverlässige und sichere Energiequelle hilft, unseren ständig wachsenden Bedarf zu decken. Leider wurden bisher durch zu phantasiereiche Schilderungen schon viele Hoffnungen erweckt, die sich nicht in der versprochenen Zeit erfüllten und daher eine verständliche Enttäuschung hinterließen. Bei sachlicher Beurteilung der Lage wird es zweifellos gelingen, alle verbliebenen Hindernisse aus dem Weg zu räumen und so der Menschheit eine Energiequelle zu erschließen, die sie für die nächste Zeit großer Sorgen entledigt.

10 Druckwasserreaktoren (DWR)

Bewährte Systeme

In der Anfangsphase der Entwicklung von Leistungsreaktoren wurden eine ganze Reihe verschiedener Reaktorkonzepte erprobt. Nach harter Auslese haben sich in der ersten Generation eindeutig die Leichtwasserreaktoren durchgesetzt. Von den Mitte 1976 betriebenen 160 Leistungsreaktoren sind immerhin 116 Leichtwasserreaktoren, von denen $^3/_5$ als Druckwasser- und $^2/_5$ als Siedewasserreaktoren ausgeführt sind.

Überall erprobt

Der Vorteil des Druckwassertyps sind der relativ einfache Aufbau und die vergleichsweise niedrigen Anlagekosten. Nach den ersten schon erwähnten Reaktoren in Obninsk und Shippingport wurden in den sechziger Jahren außer weiteren Anlagen in der Sowjetunion und den USA auch in Belgien, Italien, Frankreich, der DDR, der BRD, Spanien und der Schweiz derartige Reaktoren in Betrieb genommen. Der langjährige Betrieb dieser Systeme erbrachte einen reichen Erfahrungsschatz, der heute bei der Entscheidung über den Bau weiterer Kernkraftwerke eine ungewöhnlich große Bedeutung erlangte.

Nachteile des Wassers

Wasser ist zwar ein sehr billiges, reichlich verfügbares Kühlmittel und in thermischen Reaktoren gleichzeitig ein sehr wirksames Bremsmittel für die Neutronen, doch sind mit seiner Verwendung auch gewisse Nachteile verbunden.
Zum rationellen Betrieb von Wärmekraftmaschinen, in den Kernkraftwerken sind das die Dampfturbinen zur Erzeugung elektrischer Energie, benötigt man nämlich Temperaturdifferenzen von mehreren hundert Kelvin, damit der Wärmeübergang mit »hinreichender Kraft« stattfinden kann. In der gewöhnlichen Dampfmaschine besteht dieses Temperaturgefälle zwischen Feuerung und Kühlwasser. Der Siedepunkt des Wassers liegt unter Normalbedingungen aber schon bei 100 °C. Bei höheren Temperaturen kann es nur durch Druck am Sieden gehindert werden, das durch die damit verbundene Blasenbildung hinsichlich des Neutronenhaushalts und der Wärmeübertragung einige »Unruhe« in das System bringen und eine veränderte Betriebsführung erforderlich machen würde.

Druckbehälter

Ein Druck von 16 MPa (160 kp/cm²) läßt ohne Sieden Wassertemperaturen bis etwa 300 °C zu. Solche Werte werden heutzutage in großen Anlagen verwirklicht. Das bedingt ausreichend dimensionierte Druckbehälter, in die die gesamte Spaltzone hineinpassen muß. Diese Stahltanks sind auf Grund der sicherheitstechnischen Anforderungen und der erforderlichen Abmessungen

schwierig herzustellen und gehören dadurch zu den teuersten Anlageteilen. Die größten ihrer Art haben bei einer Höhe von etwa 15 m, einem Durchmesser von 5 m und einer Wandstärke von 235 mm eine Gesamtmasse von 530 t und sind sehr unhandliche und schwierig zu bewegende Kolosse. Der Transport derartiger Teile muß deshalb bei der Festlegung des Standortes eines Kernkraftwerkes unbedingt berücksichtigt werden (Bild 95).

Kernkraftwerke mit Druckwasserreaktoren

Kühlkreisläufe

Das Grundschema eines Kernkraftwerkes mit Druckwasser als Kühlmittel ist sehr einfach (Bild 96). Es besteht darin, die sich in Wärme umsetzende Spaltungsenergie zur Erzeugung von Elektroenergie einzusetzen. Die aus der Spaltzone des Reaktors durch einen Wasserkreislauf abgeführte Wärme wird in einer speziellen Trennstufe auf einen zweiten Kreislauf übertragen. Das Wasser dieses Kreislaufs wird dadurch verdampft. Der Dampf treibt die Schaufelräder einer Turbine *1*, die mit einem Generator *2* gekoppelt ist und auf diese Weise elektrische Energie erzeugt. Mit Hilfe eines Kondensators *3*, der von einem dritten Wasserkreislauf gekühlt wird, wird der Dampf in Wasser zurückverwandelt. Pumpen *4*, *7* führen dieses Wasser über Vorwärmer *5*, *8* schließlich zum Dampferzeuger *9* zurück.

Die Praxis bringt aber einige Schwierigkeiten mit sich. Der wohl schwerwiegendste Nachteil der Druckwassersysteme ist, daß sich bei den Betriebsparametern, die aus sicherheitstechnischen und ökonomischen Gründen gewählt werden können, nur Sattdampf erzeugen läßt. Das verringert leider den Wirkungsgrad der Energieumwandlung, der etwa 32% erreicht, und bringt außerdem eine Reihe von Schwierigkeiten beim Bau und Betrieb der erforderlichen speziellen

95 Reaktordruckgefäß des Kernkraftwerkes Biblis für einen 1200-MW(el)-Reaktor



Sattdampfturbinen Turbinenanlagen mit sich. Mit diesen sogenannten Sattdampfturbinen hatte man sich schon längere Zeit nicht mehr beschäftigt. Nun zwangen die ungünstigen Dampfparameter zur Wiederaufnahme dieser Entwicklungsrichtung. Die großen Schaufelräder dieser Turbinen (Bild 97) belasten die Lager sehr stark, die deshalb höchsten Ansprüchen genügen müssen. Weitere Besonderheiten der Sattdampfturbinen sind große Dampfmengen und hohe Dampfnässen, die zusammen an allen Oberflächen der Turbineninnenteile starke Erosionen bewirken. Darunter versteht man die physikalische Abtragung von Metalloberflächen.

Dampferzeuger Die Dampferzeuger sind, ähnlich wie Dampfkessel, zur Vergrößerung der wärmeübertragenden Fläche von zahlreichen Rohren durchzogen. Diese enthalten das zu verdampfende Wasser, das aber vom ersten Kreislauf absolut druckdicht abgetrennt sein muß. Damit soll die Gefahr der Weiterleitung einer radioaktiven Verunreinigung des ersten Kreislaufs eingeschränkt werden.

Bei der Realisierung des dritten Kühlkreislaufs gibt es ähnliche Sorgen wie bei kohlebeheizten Kraftwerken. Zur Lösung der Probleme der Kühltechnik und der Nutzung der Abwärme von Kernkraftwerken wurden einige Vorschläge erarbeitet, die noch näher erörtert werden.

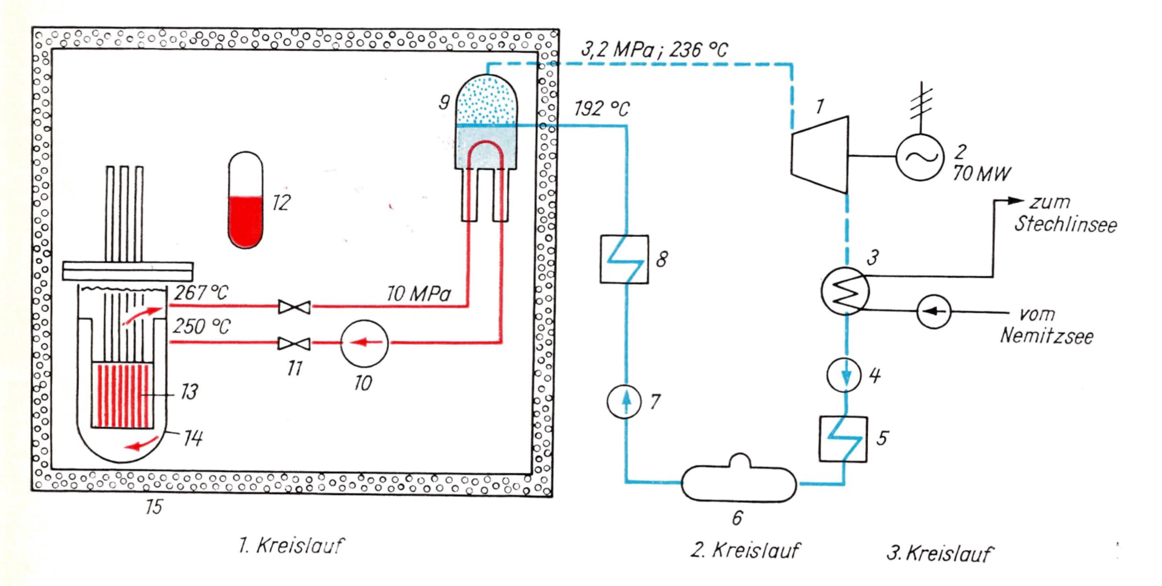
Die Gesamtanlage muß so aufgebaut sein, daß auch im Falle des sogenannten größten anzunehmenden Unfalls (GAU) nämlich dem Abreißen einer Hauptkühlmittelleitung, die Umgebung des Kernkraftwerkes nicht gefährdet wird. Deshalb wird der Primärkreislauf vollständig in einem Sicherheitseinschluß,

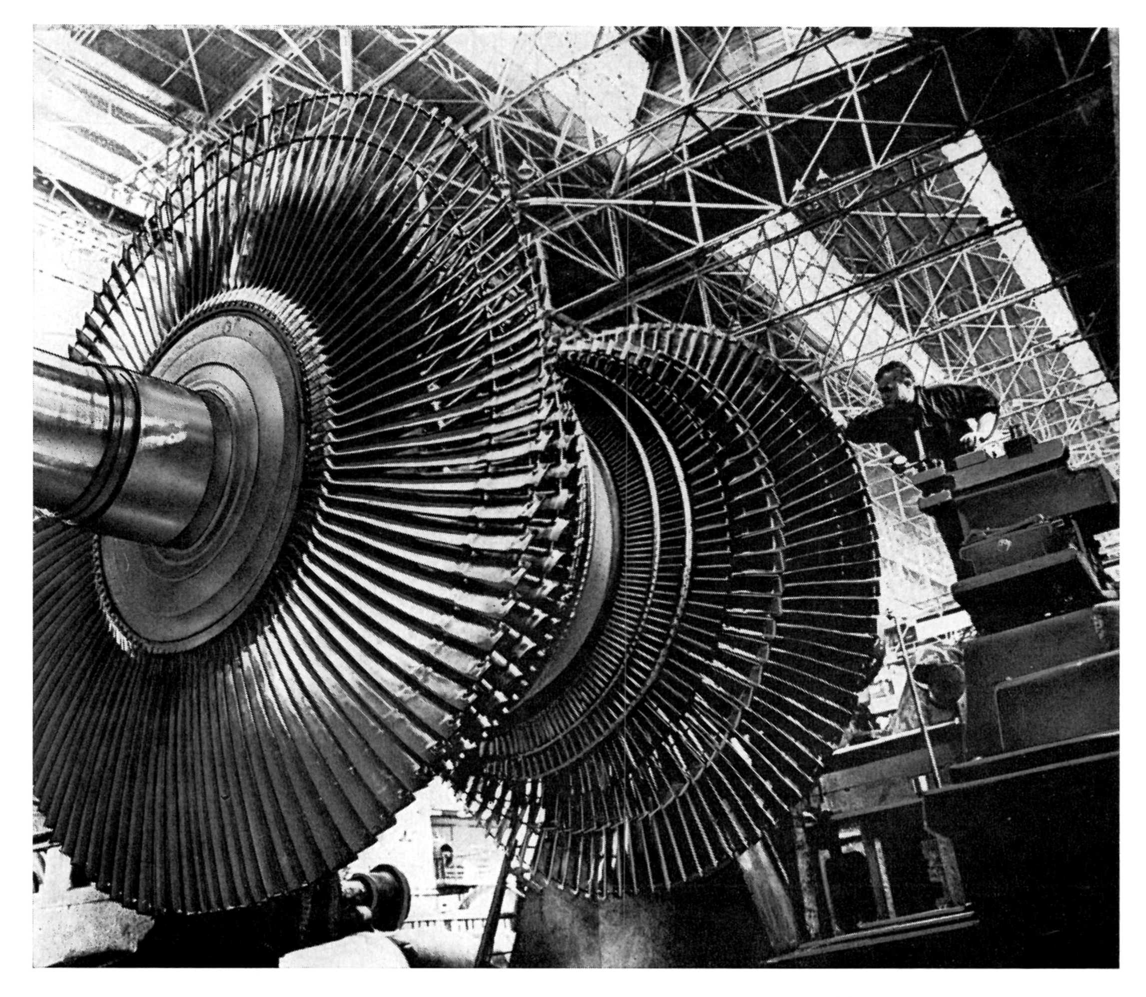
Containment auch Containment genannt, angeordnet, um das heraustretende Wasser-Dampf-Gemisch innerhalb dieses Systems auffangen zu können. Die Kosten des aus Sicherheitsgründen unbedingt notwendigen Containments machen jedoch einen wesentlichen Teil der Anlagenkosten aus.

Die Notwendigkeit, das Betriebspersonal vor der Einwirkung von Neutronen-

96 Kühlkreisläufe am Druckwasserreaktor des Kernkraftwerkes Rheinsberg (DDR)

1 *Turbine;* 2 *Generator;* 3 *Kondensator;* 4 *Kondensatpumpe;* 5 *Niederdruckvorwärmer;* 6 *Speisewasserbehälter mit Entgaser;* 7 *Speisewasserpumpe; 8 Hochdruckvorwärmer;* 9 *Dampferzeuger;* 10 *Hauptumwälzpumpe;* 11 *Absperrorgane;* 12 *Volumenkompensator;* 13 *Spaltzone;* 14 *Druckkessel;* 15 *Sicherheitseinschluß*





97 Schaufelräder einer 500-MW-Sattdampfturbine im Turbinenwerk von Charkow (UdSSR)

Strahlenschutz

und Gammastrahlen aus dem Reaktor, aber auch aus den übrigen Teilen des Primärkreises zu schützen, erfordert einen sehr hohen baulichen Aufwand. Infolgedessen entstehen für einen Kubikmeter umbauten Raumes etwa das 1,5fache der Kosten von gewöhnlichen Industriebauten.

Alle Bauteile des Primärkreislaufes beeinflussen unmittelbar die Verfügbarkeit des Gesamtsystems. Die Strahlenschutz- und Containmentwände machen diesen Bereich sehr unzugänglich, der auch während der Betriebszeit des Reaktors wegen des hohen Strahlenpegels nicht betreten werden darf. Deshalb ist es schwierig, in dieser Zeit ausreichende Informationen über sich anbahnende Defekte am Druckgefäß und den Großrohrleitungen, insbesondere in der Nähe des Druckgefäßes, zu erhalten. Im Unterschied zu konventionellen Kraftwerken, in denen für das geschulte Personal jede Veränderung im Betriebsgeschehen hörbar ist, erfordert die ausschließliche Fernbedienung des Primärteils in Kernkraftwerken neuartige Überwachungsmethoden.

Fernbedienung des 1. Kreislaufs

Insgesamt muß festgestellt werden, daß die in Druckwasserreaktoren für den ökonomischen Betrieb notwendigen Parameter hinsichtlich der Temperatur-, Druck- und strömungstechnischen Grenzwerte sowie der Strahlungsbeständig-

keit an die verwendeten Materialien hohe Ansprüche stellen und relativ kostenaufwendige Konstruktionen bedingen. Die noch nicht genannten Unterschiede der Baueinheiten des Primärkreises von Kernkraftwerken zu konventionellen Anlagen, den Reaktor natürlich ausgenommen, sind jedoch nicht so groß, daß sie hier für unsere Betrachtungen von Interesse wären. Deshalb wenden wir uns jetzt dem Herz der Anlage, dem Kernreaktor zu.

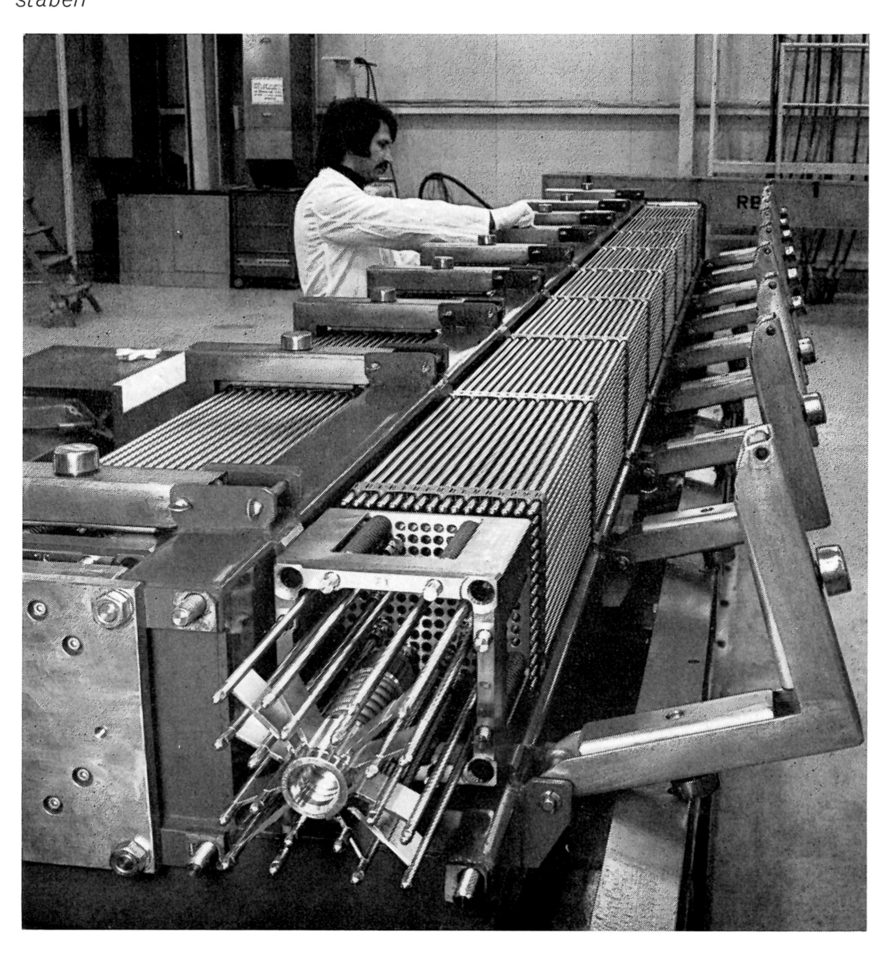
Blick in den Druckbehälter

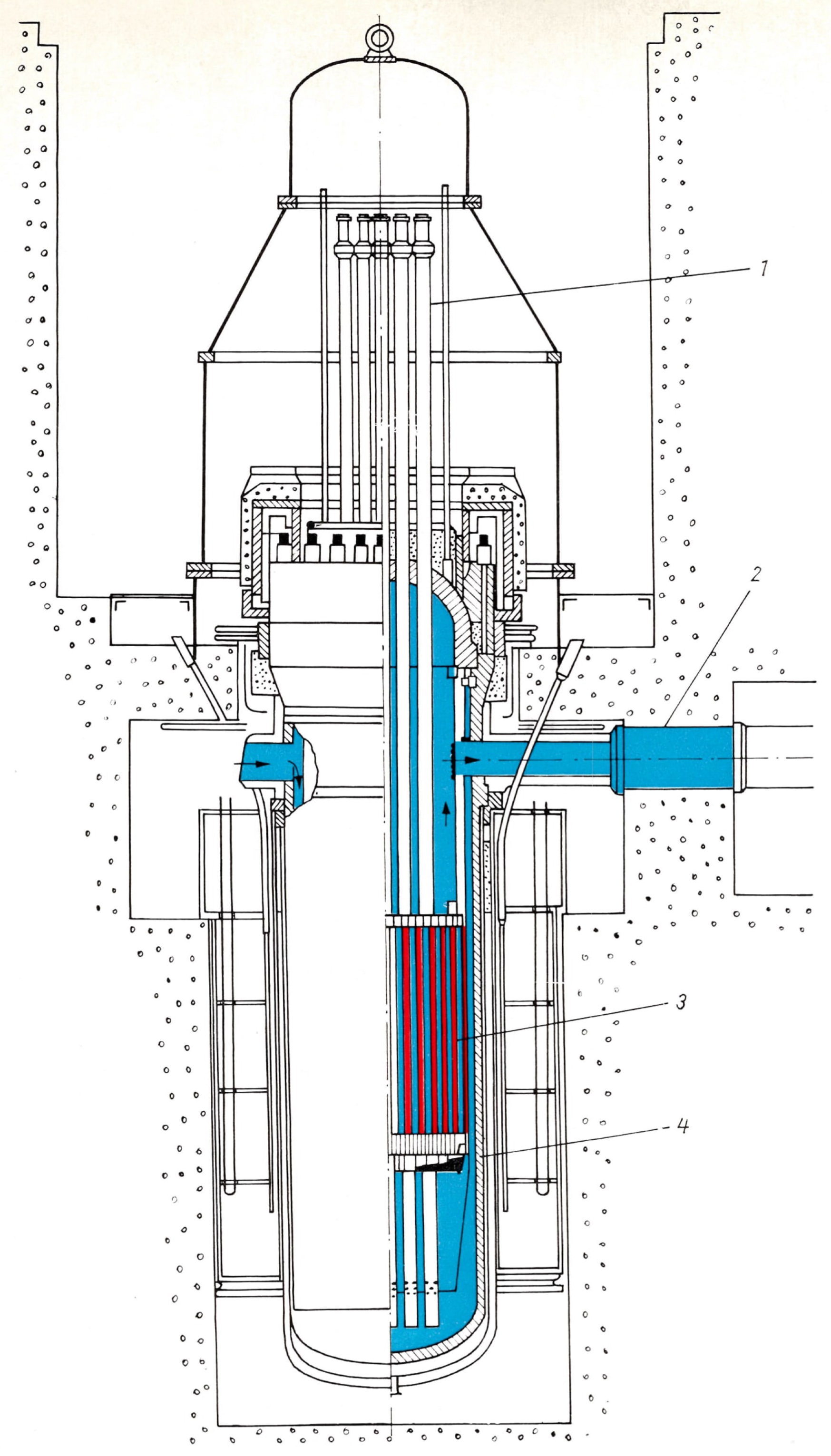
Im Druckbehälter befindet sich der gesamte Kernbrennstoff, sowie Einrichtungen für die Steuerung und Kontrolle der Kettenreaktion der Kernspaltung. Das Kühlmittel Wasser, das gleichzeitig auch Neutronenmoderator ist, durchströmt die Spaltzone von unten nach oben und führt die erzeugte Wärme ab.

Brennstoffkassetten

Der Kernbrennstoff wird in den Reaktor in Form von Kassetten eingesetzt. Diese sogenannten Brennstoffkassetten sind meist Bündel aus 200 bis 300 zylindrischen Brennelementen oder Brennstäben (Bild 98). Das Brennelement besteht aus einem Hüllrohr von 6 bis 10 mm Durchmesser und 3 bis 4 m Länge, in dem der Brennstoff eingeschlossen ist. Als Hüllmaterial wird vorwiegend Zirkon eingesetzt, da der Einfangquerschnitt für Neutronen 10mal kleiner ist als bei rost-

98 Brennstoffkassetten für das Kernkraftwerk Biblis (BRD) mit Fingerregelstäben





99 Reaktorschnitt eines Druckwassersystems
1 *Regelorgane;* 2 *1. Kühlkreislauf;* 3 *Spaltzone;* 4 *Druckbehälter*

freiem Stahl. Das Hüllrohr hat die Aufgabe, die gasförmigen Spaltprodukte einzuschließen und den Brennstoff vor der Wirkung des Kühlwassers zu schützen, das zwischen den Brennelementen in Längsrichtung hindurchströmt.

Spaltzone

Die Brennstoffkassetten werden zu einer möglichst kompakten zylinderförmigen Einheit, der Spaltzone, zusammengestellt. Die Abmessungen liegen etwa bei 2,5 bis 3 m für den Durchmesser und 2,5 bis 4 m für die Höhe. In regelmäßigen Abständen werden im Brennstoffgebiet Regel- und Abschaltkassetten angeordnet, damit die ganze Zone gleichmäßig beeinflußt werden kann (Bild 99). Der gesamte wärmeerzeugende Kern befindet sich in einem Reaktorkorb und wird von speziellen Konstruktionselementen im Druckbehälter gehalten. Diese müssen so beschaffen sein, daß strömungsbedingte Kräfte und Wärmespannungen bei allen Betriebs- und Störfällen sicher beherrscht werden. Der Kernbehälter ist am oberen Teil aufgehängt und wird durch Paßstücke zentriert. Im Bereich der Spaltzone begrenzt ein dickwandiges Mantelteil, auch thermisches Schild genannt, die Wärme- und Strahlenbelastung des Druckbehälters.

Kühlung des Brennstoffs

Das Kühlmittel wird durch mehrere getrennt voneinander angeordnete Rohrleitungen mittels großer Pumpen in den Reaktor gedrückt. In einem ringförmigen Spalt zwischen Druckbehälter und Kerngerüst wird es nach unten in einen Sammelraum unterhalb der Spaltzone geleitet. In diesem Raum sind alle Einbauten so gestaltet, daß eine möglichst gleichmäßige Strömungsverteilung am Eintritt in den Kern erreicht wird. Das Wasser strömt zwischen den Brennstäben hindurch nach oben, wird bei voller Reaktorleistung um etwa 30 K erwärmt und verläßt die Spaltzone mit einer Temperatur von 300 °C bei einem Druck von 12,5 MPa (125 kp/cm²). Diese Werte gelten für die in Lubmin bei Greifswald errichteten Druckwasserreaktoren mit 440 MW elektrischer Leistung.

Damit sich die Brennelemente nicht überhitzen, sind Strömungsgeschwindigkeiten des Wassers bis zu 5 m/s nötig. Berücksichtigt man außerdem, daß im Zentrum des Brennstoffs Temperaturen von über 2000 °C herrschen, bekommt man eine Vorstellung von den Anforderungen an die Technologie der Herstellung und die Güte der Brennelemente.

1. Barriere für Spaltprodukte

Die Verfügbarkeit des gesamten Kraftwerkes hängt in starkem Maße von der Qualität der Brennelemente ab, die trotz der großen Belastung an keiner Stelle undicht werden dürfen. Dann könnten nämlich Spaltprodukte in den Kühlkreislauf eindringen, und der Reaktor müßte aus Sicherheitsgründen beim Überschreiten des festgelegten Grenzwertes für die Radioaktivität abgeschaltet werden. Jahrzehntelange Forschungen und Betriebserfahrungen haben aber zu interessanten und sicheren Lösungen für den Aufbau der Brennelemente geführt, die im folgenden beschrieben werden sollen.

Der Kernbrennstoff

Uranoxid

Uran wird heutzutage fast ausschließlich als Oxid für die Kernenergieerzeugung verwendet. Der Schmelzpunkt der Verbindung UO_2 liegt ausreichend hoch bei 2800 °C. Anfangs hatte man es mit der metallischen Form versucht. Da sie aber sehr unangenehme metallurgische Eigenschaften hat und auch schon bei 1132 °C schmilzt, wurde diese Variante wieder fallengelassen.

Das pulverförmige Uranoxid wird zu Tabletten gesintert, die säulenförmig in die Hüllrohre geschichtet werden. Für eine feste Packung sorgt eine Druckfeder (Bild 100). Um eine enge Durchmessertoleranz zu erreichen, werden die Tabletten am Umfang geschliffen. Es ist nämlich sehr wichtig, ein bestimmtes Spiel zwischen dem Außendurchmesser des Brennstoffs und dem Innendurchmesser

Hüllrohre

der Hülle einzuhalten. Es wird so bemessen, daß bei Betriebstemperaturen ein Spalt zwischen den Tabletten und der Hülle erhalten bleibt und selbst an der heißesten Stelle keine bleibende Dehnung der Hülle durch den Brennstoff erfolgt. Um die im Hüllrohr durch den äußeren Kühlmittelüberdruck erzeugten

Spannungen zu reduzieren, wird das freie Volumen der Brennstäbe mit Helium gefüllt und dadurch ein Gegendruck erzeugt.
Nach einiger Betriebszeit stützt sich das anfangs freistehende Hüllrohr durch Kriechverformung auf den Brennstofftabletten ab. Die zulässige Belastung der Brennstäbe im Reaktor wird letztlich bestimmt durch die nach dem vollständigen Schließen des Spalts auftretende Rückdehnung der Hülle durch den Festkörperdruck des Brennstoffs. Dieser Druck wird verursacht durch die Volumenvergrößerung der Brennstofftabletten während des Betriebes, auch Schwellen genannt, infolge der Einlagerung nichtflüchtiger Spaltprodukte. Das Schwellen läßt sich beeinflussen durch die Wahl der Brennstoffdichte, der Porösität der Tabletten und ihrer Form. Die Tabletten sind an der Stirnfläche im Mittelteil vertieft. Dadurch ist dem zentralen heißen Kern in axialer Richtung eine zusätzliche Ausdehnungsmöglichkeit zur plastischen Verformung gegeben.

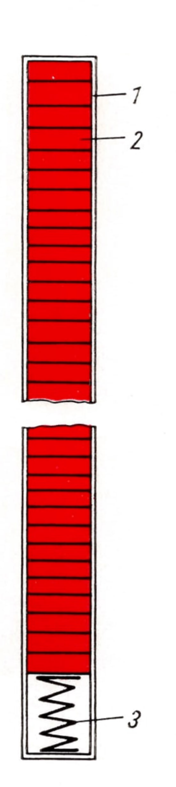
Schwellen des Brennstoffs

Die Herstellungstechnologie für Brennelemente ist heute so weit entwickelt, daß für thermische Systeme die im Brennstoff eingelagerten Spaltprodukte die Grenze für die weitere Nutzung im Reaktor festlegen. Wie bereits erläutert, fangen diese Spaltprodukte vorwiegend thermische Neutronen ein und belasten dadurch den Neutronenhaushalt. Wenn durch die angewachsene Absorption mehr Neutronen verloren gehen als erzeugt werden, kann der Reaktor nicht weiter betrieben werden.

Vergiftung durch Spaltprodukte

Weitere Verbesserungen der Brennelemente werden bei den laufenden Forschungen für die Verwendung in schnellen Reaktoren angestrebt, da in diesen Systemen bisher die Belastungsgrenzen des Materials die Aufenthaltsdauer in der Spaltzone beschränken (s. S. 156).
Welchen Belastungen die gesamte Brennstoffanordnung in Druckwasserreaktoren standhalten muß, soll durch einige Zahlenangaben deutlich gemacht werden. In Systemen mit einer elektrischen Leistung von 440 MW sind immerhin 42 t und für 1000 MW(el) sogar 66 t Uran erforderlich. Diese gewaltige Brennstoffmenge wird auf viele tausend zylinderförmige Elemente verteilt. Bei voller

Präzision in starker Strömung



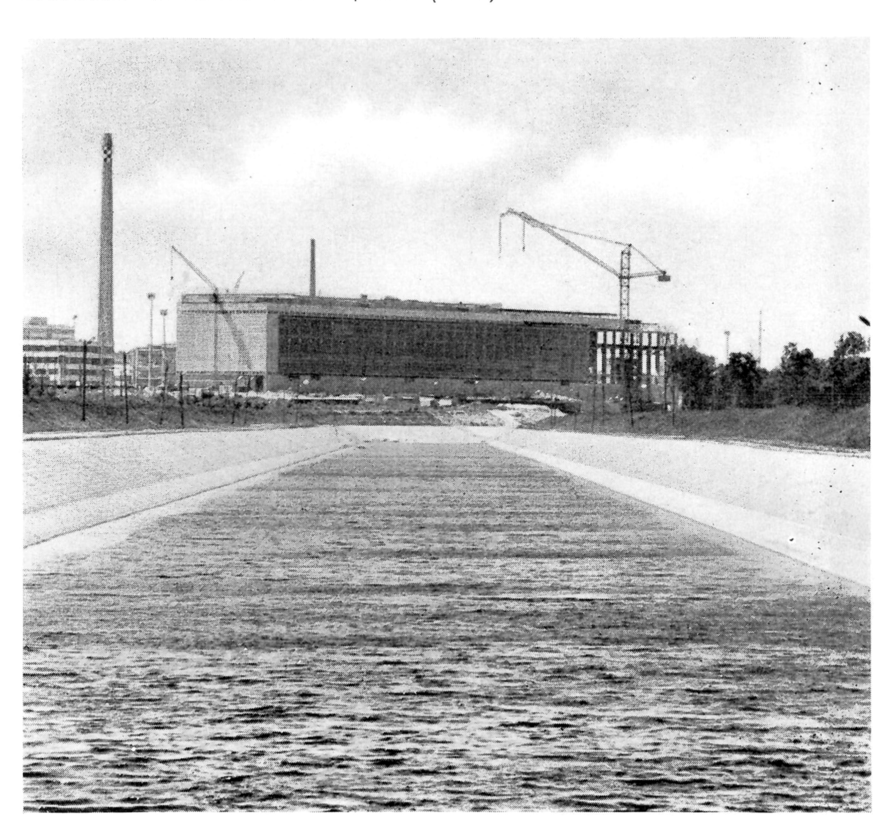
100 Hüllrohr mit Brennstoffpellets
1 *Hüllrohr;* 2 *Brennstofftabletten;* 3 *Feder*

Leistung strömen durch millimetergenaue Lücken zwischen den Brennstäben in jeder Stunde 39000 bzw. 76000 m³ Wasser. Durch mehrere Ebenen von präzisionsgelöteten Distanzgittern, in denen die zylindrischen Stäbe federnd festgeklemmt sind, wird dem Kühlwasser an jeder Stelle eine ausreichende Durchtrittsöffnung gesichert. Die Stäbe werden deshalb nur geklemmt, damit bei starkem Temperaturwechsel keine Wärmespannungen auftreten.
Bei unpräziser Ausführung der Kassettenkonstruktionen können die durch die Wärmeausdehnung und die Kühlmittelströmung hervorgerufenen Kräfte Schwingungen auslösen und infolge Schabwirkung beträchtliche Schäden an den Brennelementhüllen anrichten.
Die bisherigen Kassettenkonstruktionen haben zum Schutz der Brennstäbe Seitenwände. Neuere Entwicklungen gehen zu seitlich offenen Anordnungen über. Der Vorteil liegt darin, daß in diesem Fall, durch kleine Umlenkbleche unterstützt, eine größere seitliche Durchmischung erzwungen werden kann. Dadurch wird der Abbau von Leistungsspitzen bei ungleichmäßiger Leistungsverteilung bewirkt.

Betriebserfahrungen

Das Ziel, mit Kernkraftwerken Stromerzeugungskosten zu erreichen, die mit denen von Kohlekraftwerken vergleichbar sind, wurde mit Druckwasserreaktoren erreicht. Es ist abzusehen, daß nach einer weiteren zehn- bis zwanzigjährigen Entwicklungsphase Elektroenergie in Kernkraftwerken billiger hergestellt werden kann.

101 Einlaufbauwerk des 3. Kühlkreislaufs im VEB Kernkraftwerk »Bruno Leuschner« in Lubmin bei Greifswald (DDR)





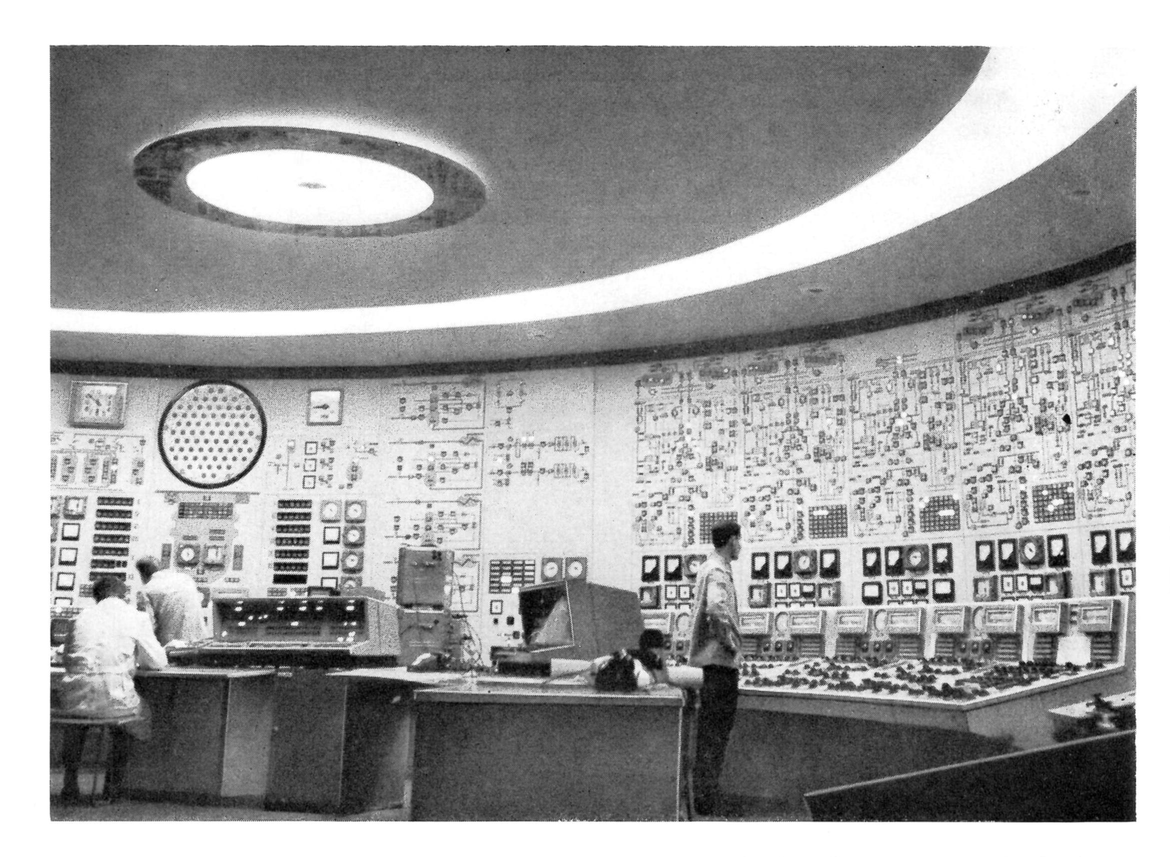
102 Gesamtansicht des Kernkraftwerkes in Nowoworonesh am Don (UdSSR)

Bewährtes in Serie

In der Sowjetunion und der ČSSR werden für alle sozialistischen Länder Druckwasserreaktoren mittlerer Leistung in Serie gefertigt. Mit der Inbetriebnahme von 440-MW(el)-Kraftwerksblöcken in Lubmin bei Greifswald trat auch in der DDR die Nutzung der Kernenergie in das industrielle Stadium (Bild 101). Eine weitere ökonomische Entwicklung der Energieerzeugung ist heute in allen Ländern ohne deutlichen Beitrag der Kernenergetik nicht mehr möglich. Die Leichtwasserreaktoren, insbesondere die Druckwasserreaktoren, spielen dabei eine wesentliche Rolle.

Zentrum der Entwicklung

Grundlage der sowjetischen Serienproduktion sind industrielle Versuchsreaktoren. Unweit von Woronesh, am linken Ufer des Don, wurde im September 1964 der 1. Block eines Druckwasserkernkraftwerkes mit 210 MW(el) in Betrieb genommen (Bilder 102, 103). Der Reaktor erwies sich als sehr stabil und leicht steuerbar. »Es ging aber nicht alles so glatt, wie es den Anschein erwecken könnte«, erinnert sich *Petrosjanz* an diese Entwicklungsphase. Während der Anfahrarbeiten gab es die unausbleiblichen Unannehmlichkeiten und Aufregungen. Viele Erscheinungen am 1. Block waren unverständlich und nicht immer gleich zu klären. Durch harte Arbeit konnte jedoch die Leistungsverfügbarkeit des Systems in den Jahren 1965 bis 1969 von anfangs 54% auf über 80% gesteigert werden.
Der 2. Block mit 365 MW(el) wurde im Dezember 1969 angefahren. Die höhere Leistung beruhte auf einer gleichmäßigeren Leistungsdichteverteilung, einer größeren mittleren Wärmebelastung der Brennelemente und einem erhöhten Wasserdurchsatz. Der 3. Block, der auf Grund weiterer Verbesserungen eine Leistung von 440 MW(el) brachte, folgte 1971 (Bild 104). 1978 ging bereits der 5. Block in Betrieb. Die elektrische Leistung von 1000 MW wurde durch vergrößerten Brennstoffeinsatz und höheren Systemdruck aber ohne wesentliche



103 Steuerraum eines Reaktors im Kernkraftwerk Nowoworonesh (UdSSR)

Vergrößerung des Druckgefäßes erreicht. Die grundlegenden technischen Prinzipien dieser Reaktoren sind mit den Lösungen identisch, die für die in den USA und der BRD errichteten Druckwasserreaktoren angewendet wurden.

Hohe Leistungsdichte

Mit einer mittleren thermischen Leistungsdichte von 100 MW je m^3 der Spaltzone und einer spezifischen Wärmeleistung von 30 bis 40 kW je kg Uran erreicht der Druckwasserreaktor bei weitem die höchsten Werte aller thermischen Reaktoren. Es sind also je 1000 MW thermischer Leistung rund 30 t Uran und 10 m^3 Spaltzonenvolumen erforderlich. Diese hohen Leistungsdichten sind infolge der Verbesserung des Wärmeübergangsmechanismus durch Ausnutzen eines besonderen Effekts möglich.

In Drucksystemen wird zwar das Temperaturniveau so niedrig gehalten, daß das Wasser den Reaktorbehälter ohne wesentliche Dampfanteile verläßt. In weiten Teilen der Spaltzone tritt jedoch bei Vollast Oberflächensieden auf. Die dabei

Einzelne Blasen sind erlaubt

entstehenden Dampfblasen werden zwar sofort nach ihrer Ablösung von den Hüllrohren im ungesättigten Kühlmittelstrom kondensiert, durch ihre Bewegung bewirken sie aber ein »Umrühren« der Grenzschicht, was eine Vergrößerung der Wärmeströmung vom Brennelement zum Kühlmittel zur Folge hat. Die Dampfblasendichte an der Hüllrohroberfläche darf in keinem Falle so groß werden, daß ein geschlossener Dampffilm daraus wird, der das Brennelement vom Kühlmittel isoliert. Das würde unweigerlich zu einem starken Ansteigen der Oberflächentemperatur und zu einer Überlastung der Hüllrohre führen.

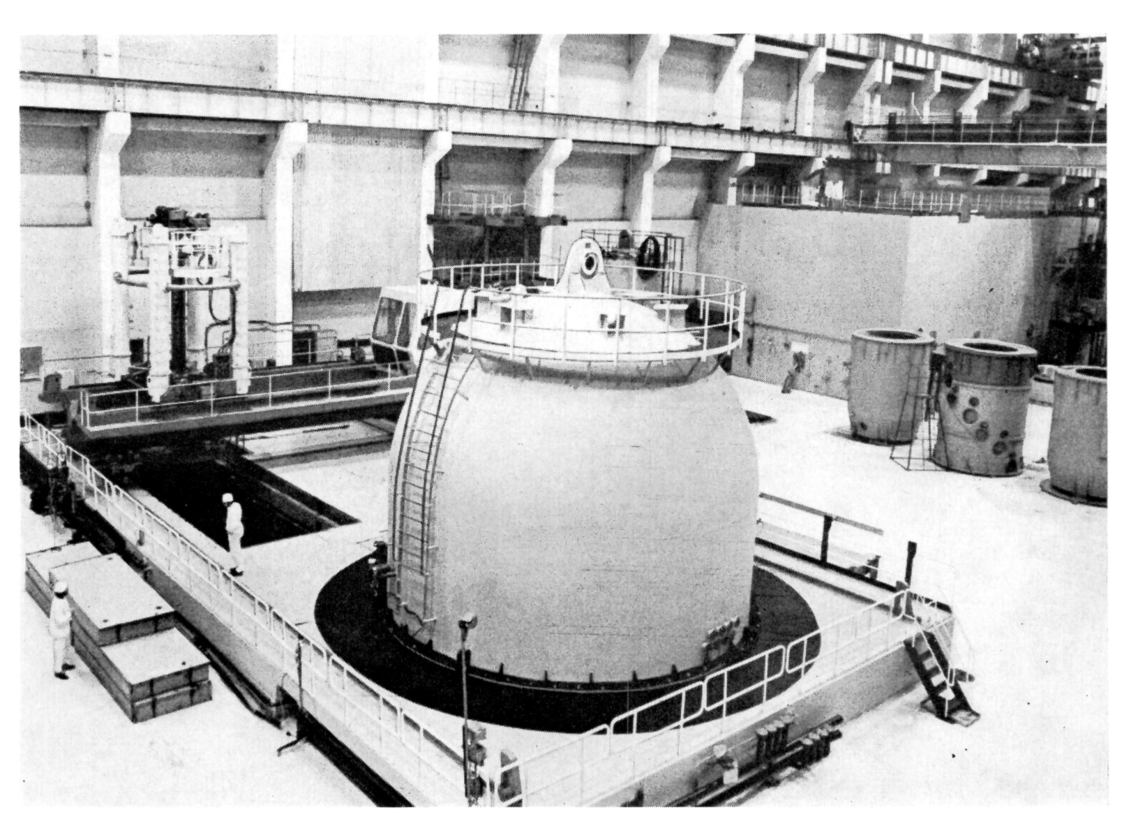
Beladung mit Brennstoff

Für das Beladen der Reaktoren hat sich ein Drei-Zonen-Zyklus durchgesetzt. Eine möglichst gleichmäßige Leistungsverteilung wird bei der ersten Beladung

durch unterschiedliche Anreicherung des Brennstoffs an Uran 235 in den drei Zonen erreicht. Der Mittelwert der Anreicherung der Gesamtmenge liegt bei 3,3%. Nach etwa einem Jahr werden die am meisten belasteten Brennelemente der zentralen Zone entnommen und die anderen Elemente jeweils in die benachbarte Zone nach innen umgesetzt. Der äußere Bereich wird frisch beladen. In jedem Jahr wird auf diese Weise etwa ein Drittel des Brennstoffs erneuert.
Insgesamt verbleibt der Brennstoff knapp 1000 Tage bei Vollastbetrieb oder rund 3 Jahre in der Spaltzone. Durch das zweimalige Umladen wird ein recht gleichmäßiger mittlerer Abbrand bis zu 30000 MWd je t Uran erreicht.
Die unvermeidlichen Entlade- und Umladearbeiten nehmen fast einen Monat wertvoller Betriebszeit in Anspruch. Das ist ein wesentlicher Nachteil der gegenwärtigen Druckwasserreaktoren. Zum Transport der aus dem Reaktor entnommenen und sehr stark radioaktiven Brennstoffkassetten sind zum Schutz des Betriebspersonals umfangreiche Sicherheitsmaßnahmen notwendig.
Nach dem Abheben der Schutzhaube und des Steuerteils des Reaktors, auch oberer Block (Bild 105) genannt, mit den durch die hohe Druckstufe bedingten komplizierten Dichtungsmechanismen, wird die Reaktorgrube bis zu einem festgelegten Pegel mit Wasser gefüllt (Bild 106). Das Wasser wirkt als Strahlenschutz und gleichzeitig als Kühlung der Brennelemente, die durch die Aufheizung infolge der starken Gammastrahlung der Spaltprodukte an der Luft verglühen würden. Eine nach Koordinaten gesteuerte Umlademaschine hebt die Kassetten aus der Spaltzone in das benachbarte Abklingbecken und führt neue Kassetten entsprechend dem Beladeprogramm in die Spaltzone ein (Bild 107).

Genauigkeit ist Trumpf

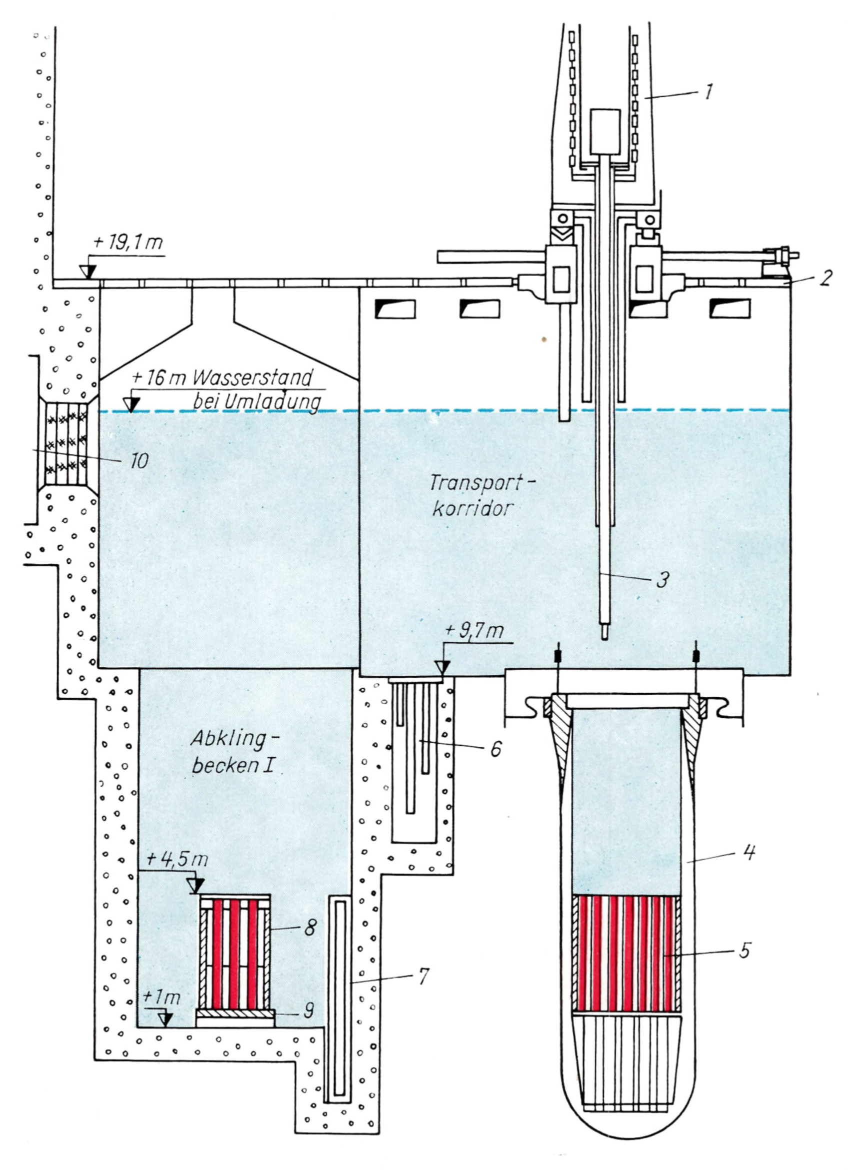
104 Blick auf die Schutzhaube eines Druckwasserreaktors im Reaktorsaal des Kernkraftwerkes Nowoworonesh (UdSSR)

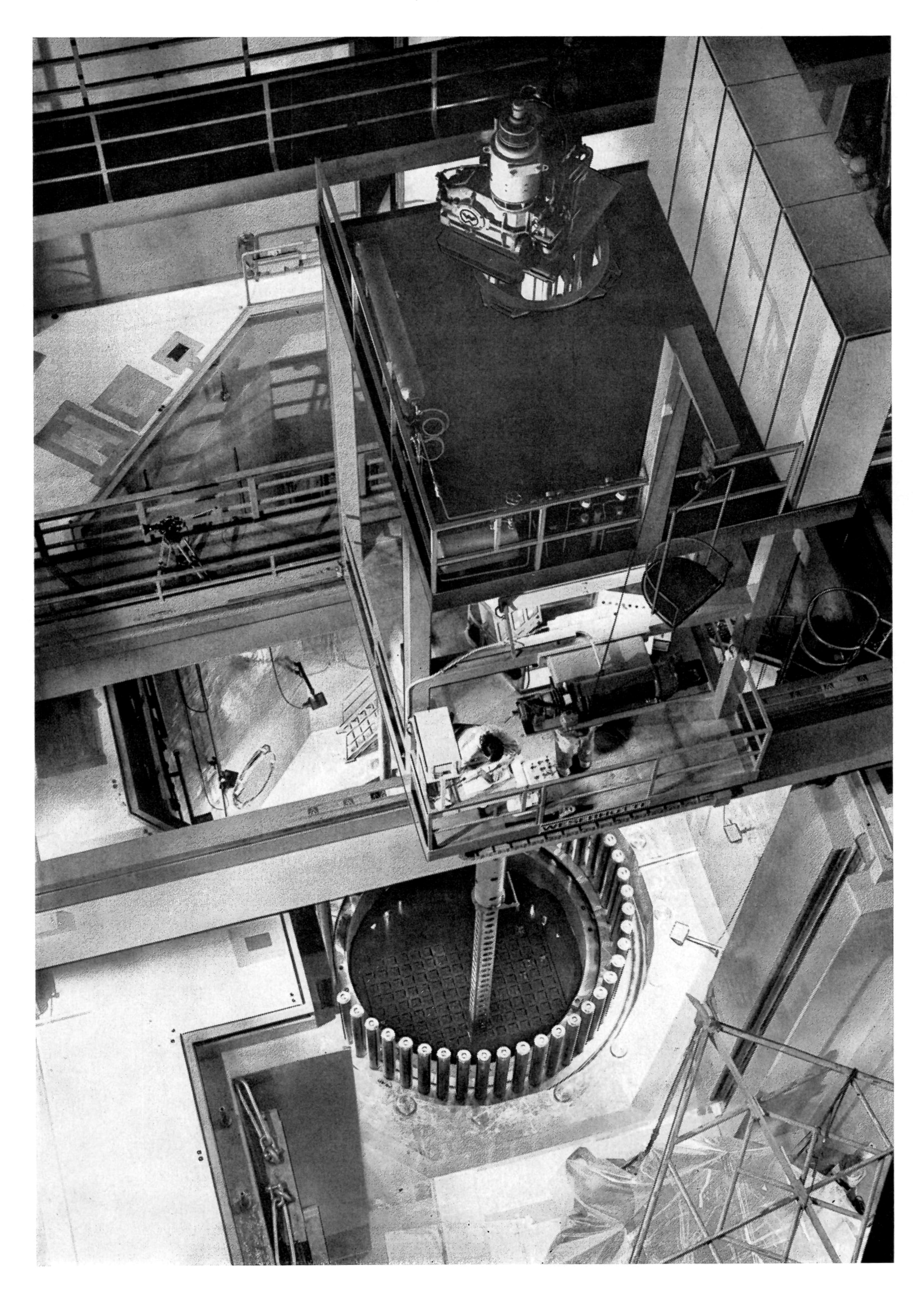


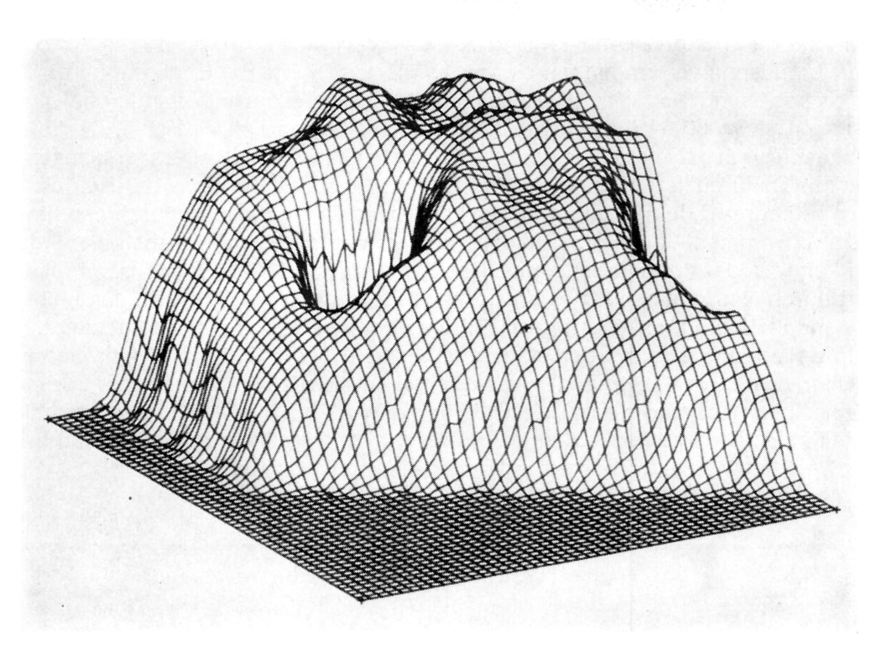


105 Oberer Block des 2. Druckwasserreaktors im Kernkraftwerk Kolsk (UdSSR) bei der Montage

106 Schema zur Umladetechnologie von Brennstoffkassetten in Druckwasserreaktoren
1 *Umlademaschine;* 2 *Gleitbahnen der Umlademaschine;* 3 *Umladestange;* 4 *Reaktor;* 5 *Spaltzone des Reaktors (Arbeitskassetten);* 6 *Schacht mit Greiferverlängerungen für Umlademaschine;* 7 *Konsole für Havarieschutzkassetten;* 8 *Kassettenbehälter;* 9 *Abstellringe für Kassettenbehälter;* 10 *Steuerraum*







108 Räumliche Darstellung eines Sektors der Spaltzone mit starken Störungen im Neutronenfluß, die durch Regelstäbe hervorgerufen wurden

Die Umlademaschinen sind Meisterwerke mechanischer Präzision. Die erforderliche Spannweite über die gesamte Reaktorgrube und die Kassettengewichte von über 100 kg bedingen eine ausreichend stabile Konstruktion. Trotzdem muß die Maschine in der Lage sein, die sehr stoßempfindlichen Kassetten auf den Millimeter genau in die richtige Position zu bringen.

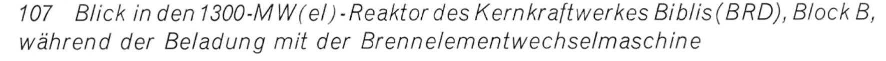
Brennstoffbilanz

Bei Beginn einer möglichst ununterbrochenen Betriebsperiode, die bei den meisten Kraftwerken 1 Jahr dauert, muß außer der kritischen Masse auch die für diese Zeit benötigte Brennstoffreserve im Reaktor vorhanden sein. Dieser Überschuß wird, wie schon erwähnt (s. S. 146), zu einem großen Teil durch die Mischung des Kühlmittels mit einem starken Absorber kompensiert. In fast allen modernen Druckwasserreaktoren wird zu diesem Zweck Borsäure homogen im Kühlwasser gelöst. Die gleichmäßige Verteilung des Absorbers hat den Vorteil, daß während des Betriebes die Spaltzone weitgehend frei sein kann von Steuerstäben. Diese rufen bei tiefem Eintauchen durch die konzentrierte absorbierende Wirkung in ihrer unmittelbaren Umgebung starke Ungleichmäßigkeiten im Neutronenfluß und damit in der Wärmeleistungsverteilung sowie in der Belastung der Brennstoffkassetten hervor (Bild 108).

Borkonzentration ist begrenzt

Die Borsäurekonzentration des Wassers darf aber nicht zu hoch sein, da sonst die inhärente Sicherheit, bewirkt durch den negativen Temperaturkoeffizienten, nicht mehr gewährleistet ist. Verringert sich nämlich die Dichte des Moderators

◄



107 Blick in den 1300-MW(el)-Reaktor des Kernkraftwerkes Biblis (BRD), Block B, während der Beladung mit der Brennelementwechselmaschine

bei höheren Temperaturen, was zu Reaktivitätsverlusten führt, ist das für die Borsäurelösung verbunden mit einer verringerten Dichte der Borkerne und löst einen positiven Reaktivitätseffekt aus. Ist die Borsäurekonzentration hoch, kann dieser positive Effekt überwiegen. Das darf auf keinen Fall eintreten. Deshalb gibt es für jedes System eine festgelegte obere Grenze für die Borsäurekonzentration. Dadurch ist leider die ausgleichbare Brennstoffreserve bei Betriebsbeginn begrenzt. In neueren Anlagen wird diese Einschränkung durch den Einsatz von ummantelten Borsilikatglasröhrchen verringert, deren absorbierende Wirkung temperaturunabhängig ist. Das Bor wandelt sich im Laufe der Betriebszeit durch Neutroneneinfang und Aussendung von Alphateilchen in das nichtstörende Lithium um. Derartige Absorber werden abbrennbare Gifte genannt.
Wir wollen uns anhand der Neutronenbilanz eines kritischen Druckwasserreaktors von etwa 1300 MW(el) verdeutlichen, inwieweit das Bor am Anfang und nach einem Abbrand von 21650 MWd je Tonne Uran am Neutronenhaushalt beteiligt ist. Die Anteile werden jeweils für das Schicksal von insgesamt 100 bei der Spaltung neu entstehenden schnellen Neutronen angegeben.

Kritische Neutronenbilanz

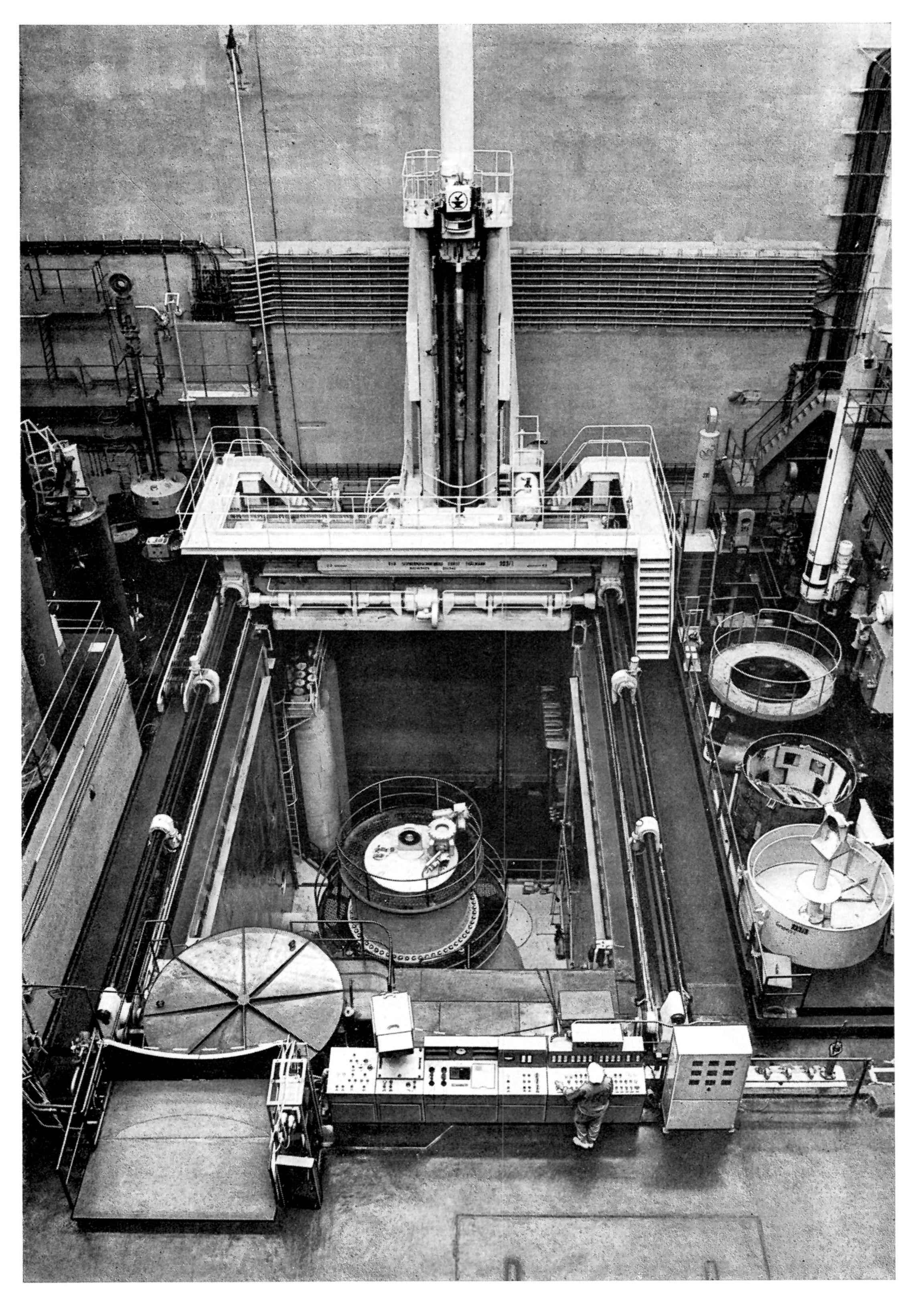
	Neubeladener Reaktor			Abbrandzustand 21650 MWd je t Uran		
Verluste durch	Einfänge	Spaltungen	Gesamt	Einfänge	Spaltungen	Gesamt
Uran 235	8,7	37,5	46,2	4,1	17,5	21,6
Uran 236	–	–	–	0,4	–	0,4
Uran 238[1])	9,3	2,8	12,1	8,9	2,7	11,6
Uran 238[2])	17,0	–	17,0	15,9	–	15,9
Plutonium 239	–	–	–	8,7	14,9	23,6
Plutonium 240	–	–	–	3,9	–	3,9
Plutonium 241	–	–	–	0,5	2,2	2,7
Samarium 149	–	–	–	0,5	–	0,5
Xenon 135	–	–	–	2,0	–	2,0
Restliche Spaltprodukte	–	–	–	6,7	–	6,7
Zirkonium	1,1	–	1,1	1,3	–	1,3
Stahl	1,4	–	1,4	0,8	–	0,8
Bor 10 im Wasser	11,3	–	11,3	0,6	–	0,6
Abbrennbare Gifte	3,3	–	3,3	–	–	–
Wasser	4,7	–	4,7	4,6	–	4,6
Leckverluste						
radial	2,6		2,6	2,8		2,8
axial	0,3		0,3		1,0	1,0
			100			100

[1]) Einfänge und Spaltungen außerhalb des Resonanzenergiebereichs
[2]) Einfänge im Resonanzenergiebereich

Von den anfangs durch das Bor und die abbrennbaren Gifte kompensierten 14,6 überschüssigen Neutronen sind in dem angegebenen Abbrandzustand nur noch 0,6 vorhanden. Das ist auf den Verbrauch des Uran 235 und die Ansammlung der neutronenfressenden Spaltprodukte zurückzuführen. Die Bilanz wird zwar wesentlich durch die neugebildeten Plutoniumisotope aufgebessert, doch nach

Gift überwiegt Zuschuß

109 Reaktorsaal im Kernkraftwerk Rheinsberg (DDR)



kurzer weiterer Betriebszeit wäre auch der restliche geringe Neutronenüberschuß verbraucht und der Reaktor könnte nicht mehr in den kritischen Zustand gebracht werden.
Der geringe Anteil der Spaltungen von Uran 238 ist darauf zurückzuführen, daß hier nur schnelle Neutronen diese Reaktion auslösen können. Die bei der Spaltung geborenen schnellen Neutronen werden aber in thermischen Reaktoren in sehr kurzer Zeit abgebremst und können so nur wenig zur Spaltung des Urans 238 beitragen.

Beitrag aus Rheinsberg

Anhand des Brennstoffverbrauchs eines Kernkraftwerkes im Vergleich zu Kohlekraftwerken zeigt sich besonders deutlich der Vorteil der neuen Technik. Schon am Beispiel des ersten Kernkraftwerkes der DDR in Rheinsberg (Bild 109), das mit 80 MW(el) eine relativ kleine Anlage ist, läßt sich das belegen. Vom 9. Mai 1966 bis zum 30. April 1967 wurden in Rheinsberg in 3723 Betriebsstunden 215 Millionen kWh elektrische Energie aus Kernenergie erzeugt. Um diese Menge in einem Kohlekraftwerk zu gewinnen, wären etwa 325000 t Braunkohle notwendig gewesen, jeden Tag rund 2800 t, für die man 112 Eisenbahnwaggons zum Transport benötigen würde. Der Kernreaktor in Rheinsberg dagegen benötigt zur Erstbeladung nur 18 t Brennstoff und dann einmal im Jahr eine Auffrischung von etwa 6 t.

Braunkohle wird teurer

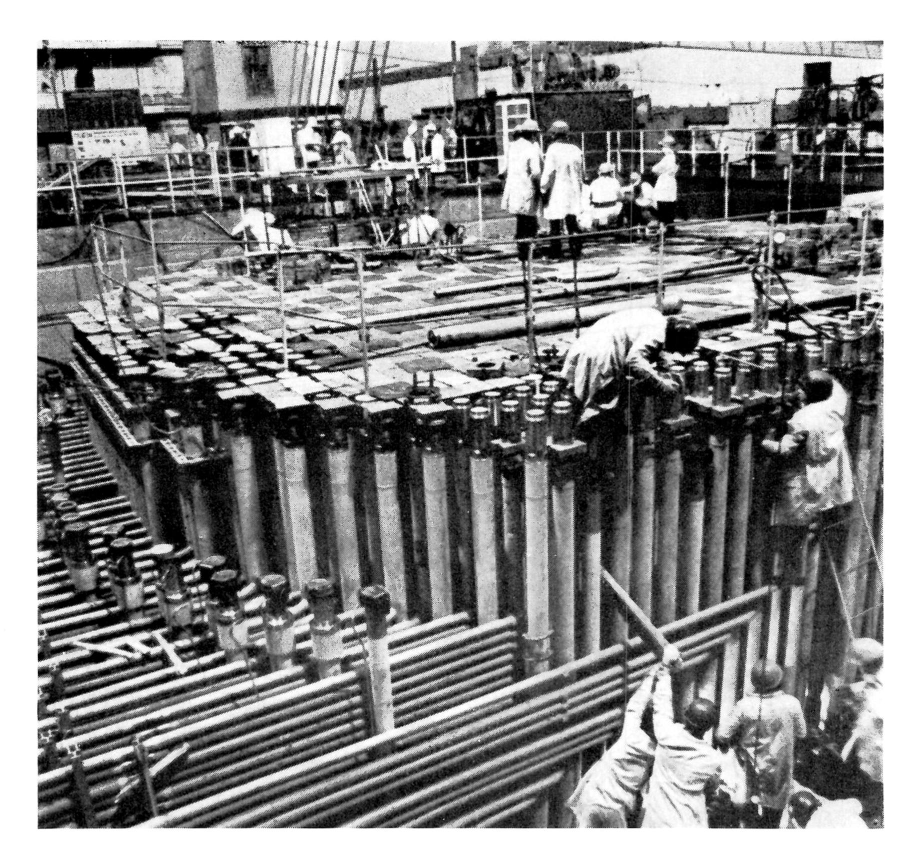
Es ist allgemein bekannt, daß gegenwärtig in der DDR die Rohbraunkohlevorkommen die wichtigste Grundlage für die Erzeugung elektrischer Energie sind. Die Braunkohlegewinnung muß aber mit sehr viel Investitionen vorangetrieben werden, und je schwieriger die Abbaubedingungen werden, desto teurer wird die Braunkohle und damit die Elektroenergie für uns. Deshalb ist die kontinuierliche Vergrößerung des Anteils der Kernenergetik an der Energieerzeugung eine äußerst wichtige Aufgabe. Die Kernenergetik wird uns in die Lage versetzen, die Volkswirtschaft ökonomisch günstig mit Elektroenergie und anderen notwendigen Energieformen zu versorgen. Mit dem weiteren Aufbau von Kernkraftwerken, zunächst mit Druckwasserreaktoren, wird der bereits begonnene Weg fortgesetzt.

Konkurrenz

Es gibt zwei Konstruktionstypen von Reaktoren, ebenfalls mit Wasser als Kühlmittel, die sich neben dem Druckwasserreaktor behaupten. Gemeint sind der Siedewasserreaktor und der besonders in der Sowjetunion entwickelte Druckröhrenreaktor.
Mitte 1976 waren auf der Erde insgesamt 43 Siedewasserreaktoren in Kernkraftwerken in Betrieb. Der größte davon mit einer elektrischen Leistung von 1075 MW. Blockeinheiten mit 1269 MW(el) befinden sich im Stadium der Planung.

Das Wasser kocht

Siedewasserreaktoren unterscheiden sich im Aufbau der Spaltzone nicht sehr von Druckwassertypen. Das Reaktorgefäß wird jedoch nur zu zwei Drittel mit Wasser gefüllt, das zugleich als Moderator und als Kühlmittel dient. Der Druck wird im System so niedrig gehalten, daß die durch die Kernspaltung in den Brennstäben erzeugte Wärme das Wasser zum Sieden bringt. Der entstehende Dampf führt die Wärme ab und kühlt dabei das obere Drittel des Brennstoffs.
Der wichtigste Vorteil des Siedewasserreaktors besteht darin, daß der entstehende Dampf direkt, ohne Wärmetauscher und Dampferzeuger, zum Antrieb einer Turbine verwendet werden kann. Nachteilig ist dagegen, daß unter diesen Umständen außer dem ersten Kühlkreislauf auch die Turbine in die besonderen Schutz- und Sicherheitsmaßnahmen hinsichtlich der Radioaktivität mit einbezogen werden muß.
Obwohl an die Reaktorbehälter bezüglich des Druckes nicht so hohe Anforderungen gestellt werden müssen, bleiben die Kosten etwa dieselben wie bei Drucksystemen. Infolge des Dampfblasengehalts und der dadurch verringerten



110 Montage eines Druckröhrenreaktors im Kernkraftwerk Kursk (UdSSR)

Moderatordichte ist nämlich für die gleiche Wärmeleistung eine größere Spaltzone erforderlich. Durch die Blasen wird außerdem das Stabilitätsverhalten des Reaktors ungünstig beeinflußt.
Betrachtet man die Entwicklungsgeschichte des Siedewasserreaktors, das erste System dieser Art wurde 1956 in Betrieb genommen, scheinen die erhofften Vorteile gegenüber den Druckwasserreaktoren noch nicht so ausgeprägt zu sein. Die bisherige Tendenz, daß etwa ein Drittel der Leichtwasserreaktoren als Siedesysteme konzipiert werden, ist auch aus den Zahlen für die künftigen Kernkraftwerke zu erkennen. Nach dem Stand von Mitte 1976 befinden sich insgesamt in der Welt 126 Druckwasser- und 45 Siedewasserreaktoren im Baustadium sowie 54 bzw. 23 in der Planung.
Der Siedewassertyp hat leider den gleichen Mangel wie die Druckwasserreaktoren, daß nämlich bei den bisher möglichen Betriebsbedingungen ebenfalls nur Sattdampf erzeugt werden kann. Mit diesem Nachteil ist eine in der Sowjetunion entwickelte spezielle Variante, der graphitmoderierte und wassergekühlte Druckröhrenreaktor, nicht behaftet.

Serie begann in Obninsk

Das Obninsker Kernkraftwerk, das erste in der Welt, bildete in der Sowjetunion den Ausgangspunkt für eine ganze Serie von Druckröhren- oder Kanalreaktoren. Parallel zur Errichtung einiger 100-MW(el)-Blöcke in Troitzk (Sibirien) begannen 1958 in Belojarsk die Bauarbeiten für ein weiteres 100-MW(el)-System, aber mit besseren thermodynamischen Parametern.
Das Grundgerüst der Spaltzone bildet ein aus einzelnen Quadern zusammengesetztes Graphitmassiv. Umhüllt mit einem einfachen Niederdruckbehälter wird der ganze Block in einem Betonschacht untergebracht. Im Graphit gibt es

senkrechte zylindrische Kanäle, in die druckfeste Rohre eingesetzt werden, die Graphitbuchsen mit einigen Längsbohrungen enthalten. In diese Bohrungen werden hohle Brennstoffrohre eingepaßt, durch die das unter Druck stehende Kühlwasser zirkuliert (Bild 110).

Der erste Reaktorblock in Belojarsk, der seit April 1964 elektrischen Strom in das Swerdlowsker Energienetz liefert, enthält 998 Betriebskanäle, von denen 730 als Verdampferkanäle ausgelegt sind, in die das Wasser mit einer Temperatur von 300 °C bei einem Druck von 15 MPa (150 kp/cm²) eintritt und um 40 K aufgeheizt als Dampf wieder verläßt. In weiteren 268 Kanälen gelang an diesem Reaktor die nukleare Dampfüberhitzung auf etwa 500 °C bei 11,5 MPa. Sie war jedoch mit gewissen Schwierigkeiten der Prozeßregulierung, insbesondere der Prozeßkontrolle, verbunden.

Nukleare Dampfüberhitzung

Das Wärmeschaltbild des Kraftwerkes weist zwei über Dampferzeuger miteinander gekoppelte Kühlkreisläufe auf. Der thermische Wirkungsgrad liegt bei 36 %, das ist eine deutliche Verbesserung gegenüber den sonst bei Druckwasseranlagen erreichten 32 %. Nachteilig ist noch das sehr komplizierte Rohrsystem, weshalb die Dampfüberhitzung noch nicht in jedem Falle angewandt wird. Es gibt zur Zeit noch ein anderes Argument gegen die Überhitzung. Die Erhöhung der Betriebstemperatur in der Spaltzone erfordert äußerst temperaturbeständige Werkstoffe. Die bisher bekannten Materialien, die dafür geeignet wären, sind jedoch meistens starke Neutronenfänger.

Nur ein Kühlkreislauf

Der zweite Belojarsker Block mit 200 MW(el) wurde 1967 fertiggestellt. Man verzichtete auf den Dampferzeuger und arbeitete nur noch mit einem Kühlkreislauf. Die technologische Gestaltung vereinfachte sich dadurch wesentlich. Die erreichten Dampfparameter, 510 bis 520 °C und 9,0 MPa, machten die Verwendung von normalen Serienturbinen möglich. In den ersten drei Jahren wurde eine Leistungsverfügbarkeit von 79,5 %, 81,1 % und 83 %, sowie eine zeitliche Verfügbarkeit von 79,6 % erreicht.

Vor- und Nachteile

Der Vorteil der Kanalvariante gegenüber Druckwasserreaktoren liegt vor allem in der Aufteilung des einen großen Druckbehälters auf viele einzelne Rohre. Dadurch ist eine individuelle Kontrolle über jeden Brennstoffkanal, das Abschalten und nötigenfalls auch das Auswechseln einzelner Kanäle ohne längere Stillstandszeiten des Reaktors möglich. Negativ wirkt sich das verzweigte und viel Raum beanspruchende Zirkulationssystem aus, das wesentlich für die höheren Baukosten gegenüber Druckwasserreaktoren gleicher Leistung verantwortlich ist. Ungünstig ist auch die fast um den Faktor 10 verringerte Leistungsdichte, die einen wesentlich höheren Brennstoffeinsatz notwendig macht.

Auch in den USA wird am Uran-Graphit-Wasser-Reaktor gearbeitet. Seit 1966 wird in Hanford eine Anlage zur Elektroenergieerzeugung eingesetzt. Der 790-MW(el)-Reaktor hatte bis zum 30. 6. 1976 immerhin fast 32800 GWh erzeugt.

Große Blöcke

Auf der Grundlage der langjährigen Erfahrungen, die in Belojarsk an den Druckröhrenreaktoren – Kurzbezeichnung RBMK – in großtechnischem Maßstab gesammelt wurden, konnten sich die sowjetischen Wissenschaftler und Techniker an größere Projekte heranwagen. Das nächste war das 1975 westlich von Leningrad in Betrieb genommene Kernkraftwerk mit 2000 MW(el). Diese Leistung wird in zwei Uran-Graphit-Kanalreaktoren RBMK-1000 erzeugt, die als Prototyp für weitere Kraftwerke zur Elektroenergieversorgung hauptsächlich des europäischen Teils der Sowjetunion gelten.

Im hohen Norden

Es gibt auch noch andere Gebiete, für die sich Kernkraftwerke sehr gut eignen. Obwohl in Sibirien riesige Wasserkraftwerke vorhanden sind, besteht dort ein Bedarf an Kraftwerken, die unabhängig vom großen Energieverbundnetz betrieben werden können. Der Bau von Hochspannungsleitungen in der unwegsamen Taiga ist nämlich oft sehr schwierig und unwirtschaftlich. Daher wurde z. B. im fernen Sibirien in der Nähe von Bilibino ein Kernkraftwerk errichtet. Seine Leistung von 48 MW(el) aus vier Blöcken ist zwar gering, reicht aber aus, die Siedlung mit Strom und Wärme zu versorgen. Trotz der kleinen Leistung ist

der elektrische Strom um das Vierfache billiger als der von Dieselaggregaten erzeugte, da der Transport des Dieselöls in solche weit entfernten Gegenden außerordentlich teuer ist.
Mit der wachsenden Verfügbarkeit über billige Elektroenergie aus großen standardisierten Kernkraftwerken werden nach und nach die konventionellen Kohlekraftwerke ersetzt werden können.
Die Notwendigkeit, die konventionelle Energieerzeugung durch eine neue Technik zu ersetzen, ergibt sich nicht nur aus der Beschränktheit der fossilen Energiequellen und dem natürlichen Wunsch, diese für eine produktivere Nutzung zu erhalten, sondern wird auch nicht zuletzt durch die zunehmende Umweltbelastung diktiert.
Wie beschränkt die Vorräte an fossilen Brennstoffen auch sein mögen, insgesamt würden sie für die Deckung des Weltbedarfs an Energie sicherlich noch ein Jahrhundert ausreichen. Die Umweltverschmutzung durch Flugasche und schwefelhaltige Gase aus konventionellen Kraftwerken nimmt aber jetzt schon bedrohliche Ausmaße an. Außerdem sind die Brennstoffvorräte auf der Welt sehr ungleichmäßig verteilt. Daraus erklärt es sich, daß die Kernenergie mit ihren vielfachen Einsatzbereichen in allen Ländern eine immer größere Rolle spielt. Die betriebssicheren und bewährten Druckwasserreaktoren werden einen wesentlichen Anteil daran haben.

Kernenergie im Vormarsch

11 Hochtemperaturreaktoren (HTR)

Vorteile des heißen Gases

In den fünfziger Jahren begannen die Entwicklungsarbeiten zum gasgekühlten Hochtemperaturreaktor in Großbritannien, den USA und der BRD. Die Versuchsreaktoren Dragon (Großbritannien), UHTREX, Peach Bottom (beide USA) und AVR (BRD) dienten ersten grundsätzlichen Untersuchungen zu Fragen der Betriebsführung, der Brennstoffzusammensetzung und der Materialauswahl. Es wurde nach einem Reaktorkonzept gesucht, das die Nachteile der wassergekühlten Leistungsreaktoren überwindet, bei denen die Kühlmitteltemperaturen selbst bei Verwendung hoher Drücke auf etwa 300 °C begrenzt sind.

Gas als Kühlmittel

Gas als Kühlmittel ermöglicht dagegen wesentlich höhere Temperaturen, die nur durch die Grenzwerte der Reaktormaterialien eingeschränkt werden. Außerdem greifen viele Gase, wie das Helium, selbst bei hohen Temperaturen kaum metallische Oberflächen an und zeigen sich auch hinsichtlich chemischer Reaktionen außerordentlich träge. Der Nachteil der schlechteren Wärmeübertragungseigenschaften kann durch größere Durchflußmengen ausgeglichen werden. Beim Helium kommt noch vorteilhaft hinzu, daß es fast keine Neutronen absorbiert. Daher wird bei einer Störung, die ein Entweichen des Heliums aus der Spaltzone zur Folge hat, die Neutronenbilanz nicht verändert.

Hüllen aus Graphit

Die Suche nach temperaturbeständigem Material für die Umhüllungen des Kernbrennstoffs und die Inneneinbauten des Reaktors führte schließlich zum Graphit, dessen Festigkeitswerte mit steigender Temperatur zunehmen. Wie heiß das Kühlmittel Helium aus dem Reaktor herausgeführt werden kann, hängt nicht allein von den Reaktorbauteilen und der Beständigkeit der Brennelemente ab, sondern auch von den nachfolgenden Anlagen. Das betrifft vor allem die direkt an den Reaktor angeschlossene Heißgasleitung, aber auch den Wärmetauscher in Zweikreisanlagen oder die Gasturbinen.

Mit dem modernsten Brennelementekonzept ist es gegenwärtig schon möglich, die mittleren Kühlgastemperaturen auf mindestens 1050 °C zu erhöhen. Sorgen bereitet aber noch die Nutzung des heißen Gases in entsprechend sicheren Anlagen. Die hohen Temperaturen sind jedoch von größtem Interesse für die

Interessante Anwendungen

Kohlevergasung, bei anderen chemischen Stoffumwandlungen und für den direkten Antrieb von Gasturbinen, die unter diesen Umständen im Verhältnis

zu ihrer Leistung ein kleines Volumen aufweisen, was eine sehr kompakte Bauweise der Gesamtanlage zuläßt.
Mit den erfolgversprechenden Anwendungsbereichen des Hochtemperaturreaktors beschäftigen wir uns noch ausführlicher. Zunächst soll gezeigt werden, welche interessanten Lösungen für den Aufbau der Brennelemente gefunden wurden.

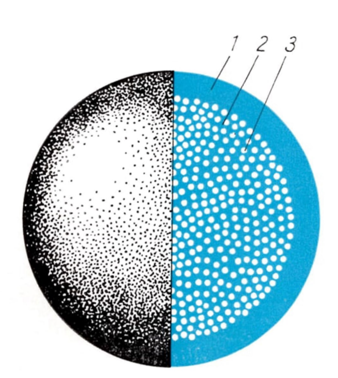
Der Brennstoff

Beschichtete Teilchen

In allen existierenden und geplanten Hochtemperaturreaktoren wird der Kernbrennstoff als kugelförmige beschichtete Brennstoffpartikel (coated particles) mit einem Durchmesser zwischen 0,1 und 0,8 mm eingesetzt. Als Schichtmaterial für die Brennstoffkerne aus Urankarbid oder Uranoxid wird Pyrokohlenstoff und im wachsenden Maße Siliziumkarbid verwendet. Die Umhüllung dient dem Zweck, die flüchtigen und festen Spaltprodukte weitgehend in den Brennstoffteilchen zurückzuhalten. Daher muß sie druckfest sein und die Einlagerung der festen Spaltprodukte in ihr Gefüge vertragen. Zwischen dieser Schicht, die bei den BISO-Teilchen einfach und bei den TRISO-Teilchen (Bild 111) dreifach ausgelegt ist, und dem Brennstoffkern hat man noch zusätzlich eine poröse Pufferschicht vorgesehen.
Das Rückhaltevermögen der beschichteten Teilchen ist außerordentlich hoch, verlangt aber auch eine anspruchsvolle Technologie der Herstellung, da die Partikeln als Ausgangspunkt der erzeugten Wärmeenergie großen thermischen Belastungen und außerdem durch die Kernspaltung einer intensiven Neutronenstrahlung ausgesetzt sind. Es wurde beobachtet, daß bei der Herstellung verursachte geringe Verunreinigungen der Schutzschicht mit Uran einen wesentlichen Anteil zur unerwünschten Kühlgasaktivität liefern können. Neuerdings werden aber mit den besten bestehenden Verfahren schon Werte unter $2 \cdot 10^{-6}$ g Uran je g Pyrokohlenstoff erreicht.

Rückhaltung der Spaltprodukte

Selbst bei intakten Hüllschichten können die Spaltprodukte durch Diffusion langsam nach außen wandern und so zur Radioaktivität des Kühlgases beitragen. Deshalb versucht man diesen Vorgang durch Umwandlung der Spaltprodukte in relativ unbewegliche chemische Verbindungen einzuschränken. Ein derartiger Effekt kann durch Einlagerung von dispersionsartig verteilten Oxiden erreicht werden. Dafür eignen sich Aluminiumoxid, Siliziumoxid und Zinkoxid, welche die Spaltproduktrückhaltung um etwa zwei Größenordnungen verbessern.



111 Brennstoffkugel des Hochtemperaturreaktors. Sie enthält etwa 33000 beschichtete Brennstoffteilchen aus Uranoxid, dem Thoriumoxid beigemischt ist. 1 *Graphitschale;* 2 *Graphit als Strukturmaterial;* 3 *beschichtetes Teilchen*

Der Kugelhaufen

Bei den bisher bekannten unterschiedlichen Konzeptionen für den Hochtemperaturreaktor ist auch das Zusammenfügen der beschichteten Brennstoffteilchen zu größeren Einheiten auf verschiedenartige Weise vorgesehen. Bei dem von *Schulten* vorgeschlagenen und in der BRD entwickelten Kugelhaufenreaktor ist die Spaltzone mit einer regellosen Schüttung von kugelförmigen Brennelementen gefüllt. Sie bestehen aus Graphit, in das die beschichteten Brennstoffteilchen eingelagert sind.

Graphitkugeln

Eine Kugel von 60 mm Durchmesser enthält ungefähr 1 g Uran, bei dem das Isotop Uran 235 von 0,7 auf 93% angereichert wurde. Die Kugelform wurde gewählt, um auch während des Reaktorbetriebes ohne Schwierigkeiten Kernbrennstoff hinzufügen oder herausziehen zu können. Auf diese Weise sollen die sonst unumgänglichen Stillstandszeiten vermieden werden. Die Kugeln durchlaufen jährlich etwa einmal die Spaltzone von oben nach unten und können durch ein Abzugsrohr am Boden der Kugelschüttung entnommen werden (Bild 112). Bei dieser Konstruktion enthalten die Graphitkugeln nicht nur den Kernbrennstoff, sondern sie haben auch die Funktion des Moderators. Das ist eine sehr günstige Kombination.

Es ergibt sich nämlich insgesamt ein negativer Temperaturkoeffizient, das heißt mit steigender Temperatur wird der Reaktor unterkritisch und mit fallender überkritisch, so daß er sich auf diese Weise selbst reguliert. Auf Absorberstäbe zur Steuerung kann daher verzichtet werden.

Regelung durch Gasströmung

Um die thermische Leistung zu regeln, genügt es, den Kühlmitteldurchsatz zu verändern. Selbstverständlich ist zum Abschalten des Reaktors eine besondere Vorrichtung eingebaut. Bekannt sind kleine Absorberkugeln, die wie eine Flüssigkeit durch die Zwischenräume der größeren Graphitkugeln hindurchgleiten können, und korkenzieherartige Abschaltstäbe, deren Form ein Hineinarbeiten in die Kugelschüttung zuläßt.

Ein Hochtemperaturreaktor (HTR) mit 300 MW(el) enthält etwa 675000 Kugeln in einer Spaltzone von 125 m³. Die geringe Kugelflußgeschwindigkeit bedingt eine sehr unsymmetrische Leistungsverteilung im Reaktor. Das Maximum liegt mit 17 MW/m³ bei den frischen Kugeln direkt unterhalb der Kugelhaufenoberfläche. In der Nähe des Bodens sind es nur noch 0,5 MW/m³. Das ergibt einen Mittelwert von etwa 5 MW/m³. Das radiale Profil kann durch eine Aufteilung in zwei Zonen und ein entsprechendes Beschicken mit erhöhter Brennstoffanreicherung in der Außenzone abgeflacht werden.

Keine Reserven nötig

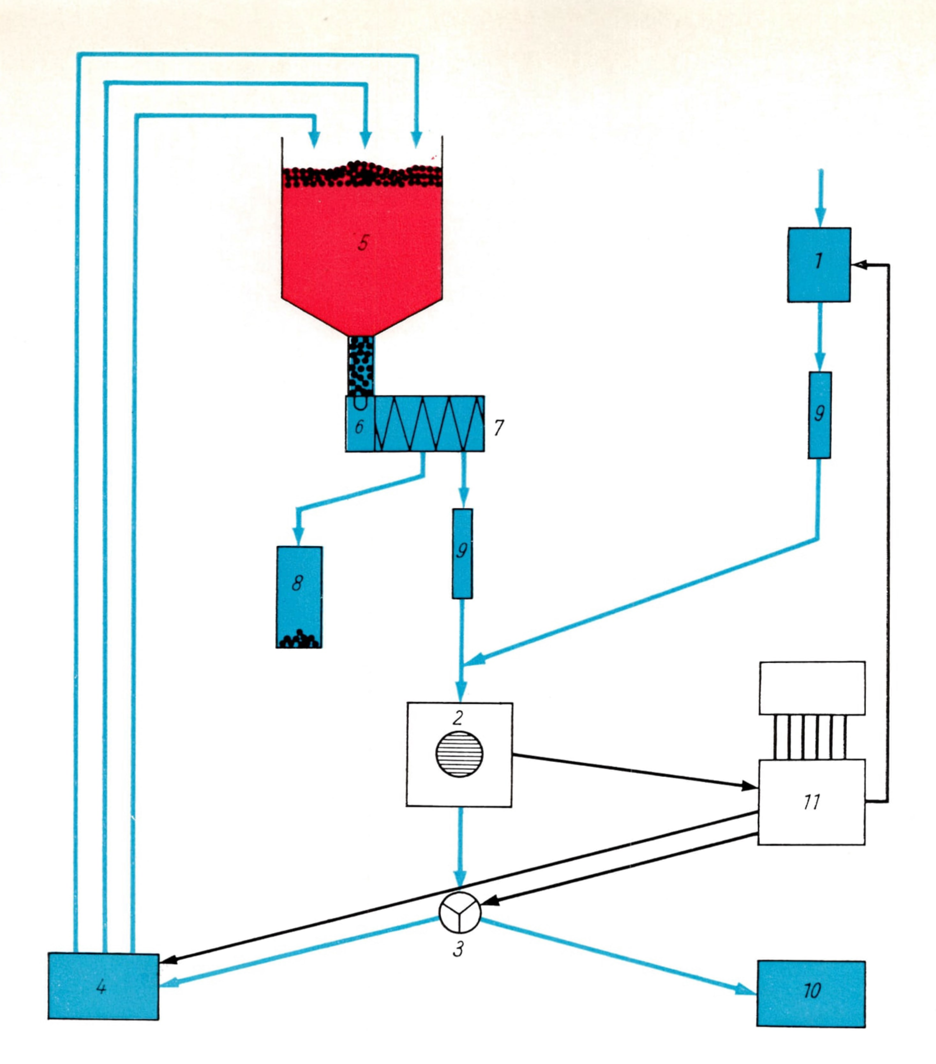
Da der Brennstoff kontinuierlich gewechselt werden kann, sind nicht wie beim Druckwasserreaktor eingebaute Reserven für eine längere Betriebszeit notwendig. Da außerdem die Brennstoffverteilung beim HTR wesentlich gleichmäßiger ist, kommt insgesamt trotz der geringeren Leistungsdichte gegenüber dem DWR eine etwa dreifach bessere Brennstoffausnutzung zustande.

Eine notwendige Voraussetzung für eine gute Brennstoffökonomie ist eine hohe Widerstandsfähigkeit der Brennelemente gegenüber Wärme- und Strahlenbelastung. Sie müssen mindestens solange intakt bleiben, wie ihr Beitrag zum Neutronenhaushalt noch positiv zu bewerten ist. Das hört sich so einfach an, verlangt aber eine umfangreiche technologische Forschung.

Technologie der Kugeln

Nach vielen Zwischenschritten ist man jetzt bei einer gepreßten Variante der Kugelbrennelemente angelangt. Bei der Herstellung werden zunächst die beschichteten Brennstoffteilchen mit Graphitpulver gemischt und mit einem Druck von nur 3 MPa (30 kp/cm²) in einer Gummimatrize kugelförmig gepreßt. Anschließend wird dieser Brennstoffkern mit reinem Graphitpulver umhüllt und unter dem hohen Druck von 300 MPa verfestigt.

Die folgende Wärmebehandlung bewirkt eine weitere Verdichtung der Graphithülle und damit eine Verbesserung des Rückhaltevermögens für die Spaltprodukte. Vor der sorgfältigen Qualitätskontrolle werden die Kugeln mit span-

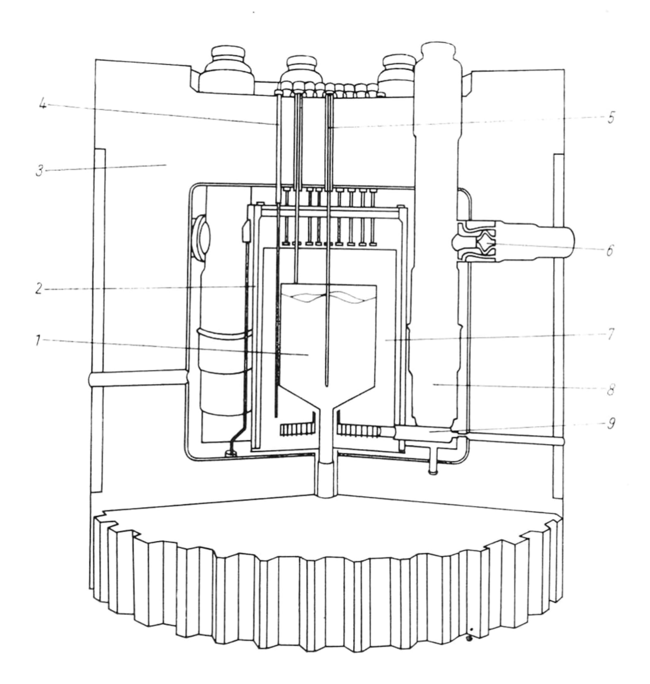


112 Durch einen Prozeßrechner gesteuerte Anlage zur kontinuierlichen Beschickung eines Hochtemperaturreaktors mit Brennstoffkugeln
1 *Kugelzugabeeinrichtung;* 2 *Unterscheidungs- und Abbrandmeßanlage;* 3 *Weiche;* 4 *Höhenförderer;* 5 *Spaltzone;* 6 *Vereinzelner;* 7 *Schrottabscheider;* 8 *Behälter für beschädigte Kugeln;* 9 *Pufferstrecke;* 10 *Kugelentnahmeeinrichtung;* 11 *Prozeßrechner*

abhebenden Verfahren genau auf Maß gearbeitet. Diese Herstellungstechnologie eignet sich für eine vollautomatisierte Serienproduktion. Das ist nicht nur ökonomisch günstig, sondern bei der Verwendung von schon einmal bestrahltem Brennstoff auch unbedingt notwendig.

Konstruktion des Reaktors

Ein Beispiel eines HTR zeigt Bild 113. Unmittelbar an die Spaltzone und den Graphitreflektor schließt sich ein Kohlesteinmantel zur Wärmeisolation und zur Schwächung der radioaktiven Strahlung an. Alle Teile befinden sich in einem zylindrischen Reaktordruckbehälter aus Spannbeton, der durch Auskleidung mit Stahlfolie gasdicht ist. Die Wärmetauscher der drei parallelen Kühlkreisläufe sind bei dieser Ausführung von der Spaltzone getrennt untergebracht.



113 Primäranlage eines Hochtemperaturreaktors
1 *Spaltzone;* 2 *thermischer Schild;* 3 *Spannbetonbehälter;* 4 *Dampferzeuger;* 5 *Heißgasrohr*

Das Fließschema des Heliums ist durch Pfeile gekennzeichnet. Der gesamte Primärkreislauf befindet sich in einem mit Stickstoff gefüllten Schutzbehälter aus Stahlbeton, der bei einem Bruch im Primärkreislauf den auftretenden Druck aufnehmen kann. Die Inertgasfüllung soll bei einem Leck das Eindringen von Luft in die heiße Spaltzone und damit einen Graphitbrand verhindern. Weitere Sicherheitsbetrachtungen werden in einem besonderen Abschnitt behandelt.

Brennelementvarianten

Sechskantstücke

In den USA wurde für Hochtemperaturreaktoren ein Brennelement in Form eines Sechskantblockes mit immerhin 36 cm Schlüsselweite und 80 cm Höhe entwickelt. Es enthält etwa 200 Bohrungen für Brennstoff und weitere 100 für die Kühlung. Diese Lösung führte jedoch zu einigen wärmetechnischen Schwierigkeiten. Bis zur endgültigen Beurteilung muß eine gründliche Erprobung in Originalgröße abgewartet werden.

Tubulare Blöcke

In Großbritannien gab man bisher dem sogenannten tubularen Blockelement den Vorzug. Die Brennstoffrohre aus Graphit haben die Form eines Hohlzylinders und sind durch Rippen mit dem Strukturgraphit des Brennelementeblocks verbunden. Ähnlich wie bei der amerikanischen Lösung treten unter bestimmten Umständen Wärmespannungen auf, die zu unerwünschten Nebenerscheinungen führen können.

Erfahrungen

In den USA hat man umfangreiche Erfahrungen für den Betrieb des HTR gesammelt. So wurde die Kraftwerksanlage Peach Bottom im Oktober 1974 nach achtjähriger Laufzeit stillgelegt. Als Grund wird angegeben, daß ein weiterer Betrieb keine neuen Erkenntnisse liefern würde. Es waren nacheinander zwei

Kernladungen im Einsatz, wobei mit der zweiten Beladung im Mittel eine hohe zeitliche Verfügbarkeit von 88% erreicht wurde. Die Dampferzeuger hatten sogar während der ganzen Zeit kein einziges Leck. Durch Untersuchungen an der stillgelegten Anlage werden interessante Aussagen zur Spaltproduktablagerung, zum Materialverhalten der Dampferzeuger und zu Verschleißerscheinungen an anderen Betriebskomponenten erwartet.
Der kommerzielle Einsatz des Hochtemperaturreaktors soll mit einer Zweikreisanlage in Fort St. Vrain erfolgen. Bei einem Wirkungsgrad von 42% ist eine elektrische Leistung von 330 MW und eine mittlere Kühlgastemperatur von 750 °C vorgesehen. Am 31. 1. 1974 wurde dieses Kraftwerk zum ersten Mal kritisch.
Die Tests ergaben eine gute Übereinstimmung zwischen den vorausberechneten Werten und den Meßergebnissen. Es sah alles ganz hoffnungsvoll aus, bis eine Reihe von Defekten zu Wassereinbrüchen in den Reaktor führte, die eine mehrfache Außerbetriebnahme zur Folge hatten.
Man hatte sich für die Hilfsantriebe der Kühlgasgebläse eine ungewöhnliche Lösung ausgedacht. Sie waren mit Peltonrädern ausgerüstet worden, die durch das Hochdruckspeisewasser der Dampfkraftanlage angetrieben werden. Durch einige Lecks hatte das Wasser seinen Weg in den Reaktor gefunden. Diese unliebsamen Überraschungen verzögerten den Beginn des Leistungsbetriebes beträchtlich.

Versuchsreaktor

Der britische Dragon-Reaktor zeigt trotz seiner recht großen Leistungsdichte nach wie vor ein gutes Betriebsverhalten und hat eine hohe Verfügbarkeit. Als Versuchsreaktor bietet er ideale Bedingungen zur Bestrahlung von Brennelementen, Graphitteilen und anderen Reaktoreinbauten. Die Gasaustrittstemperatur wurde versuchsweise von 850 °C schon bis auf 1050 °C angehoben.

Neue Projekte

In der Sowjetunion wird der HTR wegen seines hohen Temperaturpotentials als notwendige Ergänzung zum schnellen Brutreaktor (SBR) angesehen, letzterer soll aber dort auch weiterhin im Mittelpunkt der zukünftigen Strategie stehen. Es wird auch über eine Verbindung von HTR und dem gasgekühlten SBR diskutiert.
Für den Prototypreaktor AVR in Jülich (BRD) hat nach fünfjährigem Vollastbetrieb bei einer thermischen Leistung von 46 MW und etwa 90% zeitlicher Verfügbarkeit der mittlere Brennstoffabbrand den Wert von 100000 MWd/t überschritten. Insgesamt wurden dabei 1 Million Brennelementkugeln umgewälzt, von denen nur 80 Bruchstellen zeigten.
Demzufolge war auch die Abgabe von Radioaktivität an die Umgebung außerordentlich gering, sie betrug z. B. im ganzen Jahr 1974 nur $37 \cdot 10^{10}$ Bq (10 Ci)!

Erste Kraftwerke

Im Auftrag der Hochtemperaturkernkraftwerke GmbH wird von einer Firmenvereinigung bei Schmehausen (BRD) ein Kraftwerk mit 300 MW (el) errichtet. Der Bau ist 1974 begonnen worden und wird voraussichtlich 1978 abgeschlossen. Für die Konzeption der Anlage und der Brennelemente wurden die guten Erfahrungen mit dem AVR genutzt.
Der Erfolg der Projekte wird davon abhängen, ob die Investitionskosten der Anlagen konkurrenzfähig sind und ob die Kraftwerke mit ökonomisch vertretbaren Mitteln gewartet werden können. Deshalb sollen ausgefallene Werkstoffe vermieden und einfache Konstruktionselemente bevorzugt werden. Auch der Bau des Reaktorbehälters, bestehend aus Spannbetonbehälter mit gasdichter Auskleidung und Isolierung, ist noch zeitraubend und teuer, gleiches gilt für die Dampferzeuger.
Bei den künftigen größeren Entwürfen muß die geringe Spaltproduktfreisetzung gewährleistet bleiben und die Mechanik der Ablagerung gut bekannt sein. Über die Bewährung der vorgesehenen Brennelemente gibt es genügend Nach-

weise. Die Herstellungskosten hängen von den hergestellten Mengen ab und lassen sich bei entsprechend großen Anlagen merklich verringern. Die Brennelemententwicklung wird sich aber künftig noch mehr als bisher an den Möglichkeiten der Wiederaufbereitungsanlagen orientieren müssen.
In Japan hat man sich, beeinflußt durch das starke Interesse der Stahlindustrie, in den sechziger Jahren ebenfalls dem HTR zugewandt. Es wird zunächst an einem Programm für den Bau eines Versuchsreaktors mit 50 MW thermischer Leistung und einer Zweikreisanlage zur Gewinnung von Prozeßwärme gearbeitet. Frankreich betreibt eine Entwicklung auf diesem Gebiet, die sich sehr eng an die in den USA entwickelten Reaktoren vom Blocktyp anlehnt. In Kooperation mit Unternehmen in den USA und der BRD wird eine Modifizierung dieses Reaktortyps für die französischen Verhältnisse angestrebt.
Bei den Angaben zur Zusammensetzung der Brennstoffkugeln ist sicherlich der hohe Anreicherungsgrad des Uran 235 aufgefallen. Das hat eine besondere Bewandtnis. Man wählt die Anreicherung deshalb so hoch, um in einfacher Weise dem Brennstoff nicht spaltbares Thorium in etwa der fünffachen Menge beifügen zu können. Das Thorium wird während des Reaktorbetriebes durch Neutroneneinfang in Protaktinium 233 umgewandelt, welches dann mit einer Halbwertzeit von 27 Tagen unter Aussendung von Betateilchen in das spaltbare Uran 233 zerfällt. Auf diese Weise erschließt man sich die großartige Möglichkeit, durch das verhältnismäßig reichlich zur Verfügung stehende Thorium die Vorräte an Reaktorbrennstoff beträchtlich zu erweitern. Allerdings muß man dafür Erschwernisse in Kauf nehmen, die durch die Verwendung von hochangereichertem Material und bei der Wiederaufarbeitung des Brennstoffes entstehen. Insgesamt gesehen kann jedoch mit wesentlichen Vorteilen gerechnet werden.

Thorium wird Spaltstoff

Reaktor mit Zukunft

Ziehen wir eine Bilanz hinsichtlich der Betriebssicherheit, der Brennstoffausnutzung und des Anwendungsbereichs, können wir durchaus den Hochtemperaturreaktor als einen Reaktor der zweiten Generation ansehen, der viele Nachteile der Vorgänger überwunden hat und sich in jeder zukünftigen Reaktorstrategie behaupten wird.

Schnelle Brutreaktoren (SBR)



Den schnellen Brütern gehört die Zukunft

Forschungen in der Sowjetunion

In der Sowjetunion wird den schnellen Reaktoren in der nächsten Zukunft eine bedeutende Rolle zuerkannt. Der Grund dafür ist der entscheidende Vorteil dieser Systeme: eine effektivere Ausnutzung des Kernbrennstoffes und die Möglichkeit, Uran 238 und Thorium 232 vollständig in den Brennstoffzyklus einzubeziehen. Die breitangelegten Untersuchungen der neutronenphysikalischen, wärmetechnischen, technologischen und technischen Aspekte der schnellen Reaktoren, die seit den fünfziger Jahren betrieben wurden, ermöglichten den sowjetischen Wissenschaftlern und Ingenieuren, den derzeitig aussichtsreichsten Typ zu ermitteln, einen mit oxidischem Brennstoff betriebenen, natriumgekühlten schnellen Reaktor.
Die Forschungsaufgaben wurden im Physikalisch-Energetischen Institut in Obninsk bei Moskau an einer Serie von Versuchsreaktoren mit der Bezeichnung BR-1, BR-3, BR-5 und an zwei speziellen schnellen Systemen gelöst, die Modelluntersuchungen für größere Reaktoren gestatten. Auf Grund der gesammelten Erfahrungen wurde das erste Versuchskernkraftwerk mit dem schnellen Reaktor BOR-60 (Leistung 60 MW) 1969 in Dimitroffgrad und das erste industrielle Kernkraftwerk mit dem schnellen Reaktor BN-350 (1000 MW Wärmeleistung) Mitte 1973 unweit der Stadt Schewtschenko an der Küste des Kaspischen Meeres in Betrieb genommen. Beide Reaktoren laufen seit der Inbetriebnahme zufriedenstellend und haben die Sicherheit von schnellen Systemen dieser Größe eindeutig nachgewiesen.
Die Brüterentwicklung ist nach der Sowjetunion dann auch von den anderen großen Industriestaaten seit Anfang der sechziger Jahre mit ständig wachsendem Aufwand beeindruckend stetig fortgeführt worden. Diese Entwicklung hat ihre Ursachen in der einfachen und einleuchtenden Begründung ihrer Notwendigkeit: Wenn zur Energieerzeugung nur wie bisher thermische Reaktoren verwendet würden, dann hätten wir innerhalb weniger Jahrzehnte einen Versorgungsengpaß an Natururan. Die schnellen Brüter zeigen den Ausweg aus dieser Lage, die Möglichkeit Kernbrennstoff zu »erbrüten«.

Alternativen zum Brüter?

Es wird heute in aller Welt daran gearbeitet, technische Verfahren zur Nutzung der Sonnen-, Meeres-, Wind- und geothermischen Energie zu erarbeiten und einzusetzen. Ohne Zweifel werden wichtige Anwendungsmöglichkeiten er-

schlossen. Es gibt aber kaum noch ernsthafte Energiefachleute, die diese Energiequelle als umfassende Alternative zur Kernenergie ansehen, bedingt durch die meist begrenzte Kapazität und die Ortsgebundenheit. Es wird auch kaum noch behauptet, daß die wirtschaftliche Nutzung der Fusionsenergie – falls erreichbar – rechtzeitig einsetzt, um den schnellen Brutreaktor überflüssig zu machen. Deshalb wird der Brutreaktor mit größter Wahrscheinlichkeit ein wichtiges und nicht zu ersetzendes Zwischenglied darstellen.

Schnelle Versuchsreaktoren

In den sechziger Jahren sind nach dem sowjetischen Reaktor BR-5 (1960) mit dem DFR in Großbritannien (1962), dem EBRII (1965) in den USA, dem Rapsodie (1967) in Frankreich und dem BOR-60 (1969) in der Sowjetunion eine Reihe von Versuchsreaktoren mittlerer Leistung von 40 bis 60 MW(el), die das Kühlmedium Natrium bis zu etwa 500 °C erhitzen, in Betrieb genommen worden. Das wesentliche Ziel dieser Anlagen ist es, Erfahrungen zur Konstruktion der Brennelemente zu gewinnen, sowie Baugruppen von Ausrüstungen für große Leistungsreaktoren zu erproben.

Prototypkraftwerke

Die nächstgrößeren Systeme wurden in den siebziger Jahren gebaut, Prototypkraftwerke mit einer elektrischen Leistung um 300 MW. So ist der sowjetische Reaktor BN-350 seit Mitte 1973 in Betrieb. Er hat eine Wärmeleistung von 1000 MW und ist für die Stromerzeugung (150 MW) und die Entsalzung von Meerwasser (120000 m^3 in 24 Stunden) vorgesehen. Der französische Phenix (250 MWe) arbeitet seit Anfang 1974 und der englische PFR [250 MW (el)] seit Mitte 1975. Anfang 1973 begann der Bau des SNR-300 [300 MW(el)] in Kalkar in der BRD. Der Abschluß der Arbeiten wird für 1980 erwartet (Bild 114).

Erstes Demonstrationskraftwerk

In der Sowjetunion geht der Bau des ersten Demonstrationskraftwerkes seinem Ende entgegen. Der schnelle Reaktor BN-600 [600 MW(el)]wird als dritter Block des Kraftwerkes in Belojarsk errichtet (Bild 115). Er weist verbesserte technische und wirtschaftliche Parameter auf und ist nach dem Prinzip der integrierten Bauweise konstruiert, bei der Spaltzone, Pumpen und Zwischenwärmetauscher der drei Kühlkreisläufe in einem Behälter untergebracht sind.

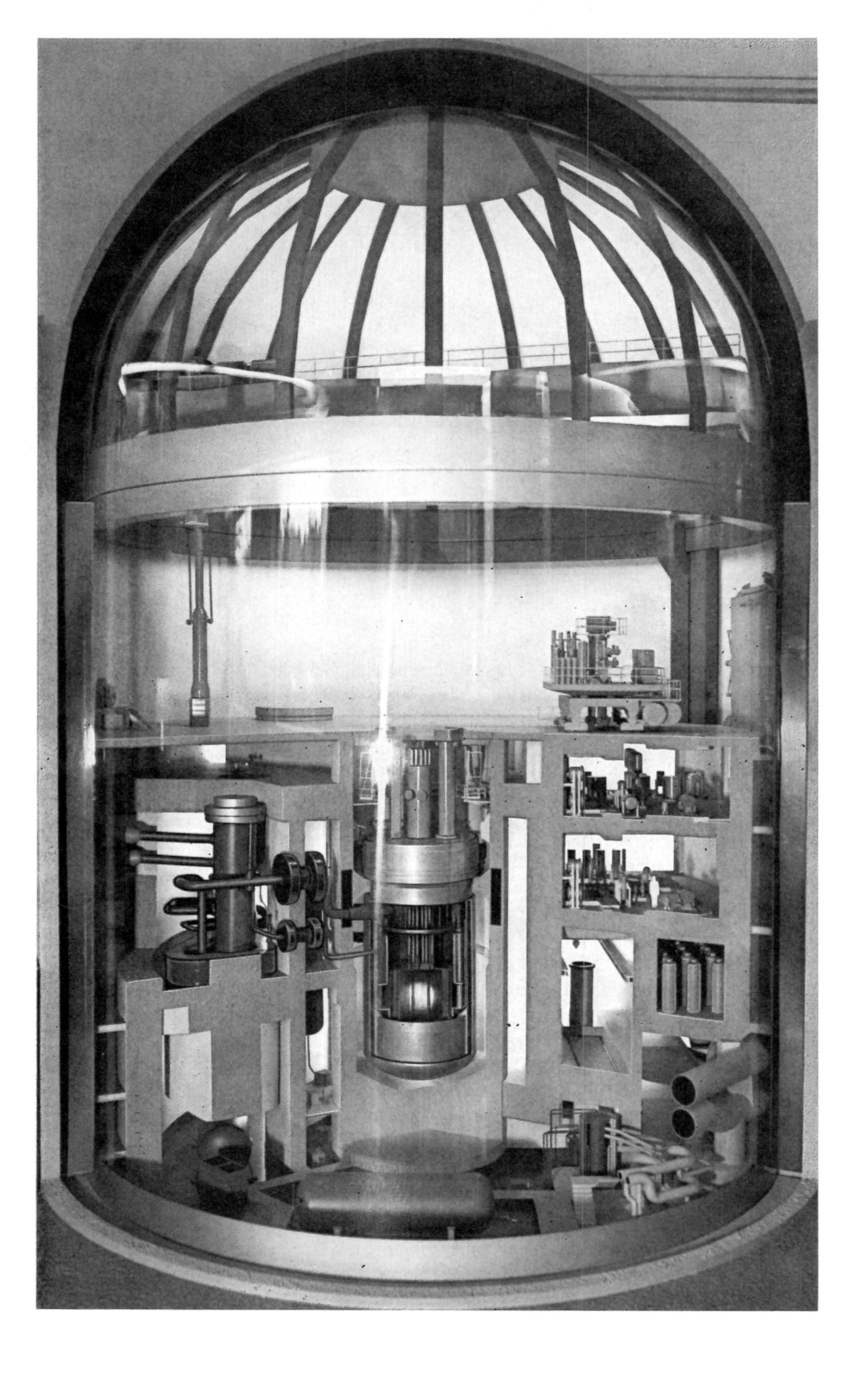
Der BN-350 und der SNR-300 haben ein anderes Konzept. Zwischenwärmetauscher und Primärpumpen sind in einem besonderen Raum getrennt vom Reaktortank untergebracht und mit diesem durch Rohrleitungen von 600 mm Durchmesser verbunden. Bei einem Rohrdurchbruch im Primärkreislauf wird durch Auffangwannen unterhalb der Pumpen und Zwischenwärmetauscher eine Mindestmenge Natrium im Reaktortank garantiert, die zur Nachwärmeabfuhr ausreicht. Das rechteckige Reaktorgebäude ist druckfest ausgeführt sowie in eine innere Zone mit dem gesamten Primärkreislauf und in eine äußere Zone unterteilt.

Bemerkenswert, weil erstmalig bei einem Kernkraftwerk verlangt und ausgeführt, ist die sogenannte Bodenkühleinrichtung unterhalb des Reaktortanks vom SNR-300, die auch Core-Catcher genannt wird. Sie ist so ausgelegt, daß nach dem sehr unwahrscheinlichen Störfall, der ein Schmelzen des Brennstoffs und einen Durchbruch der Tankwand zu Folge hat, der Spaltstoff sicher aufgenommen werden kann.

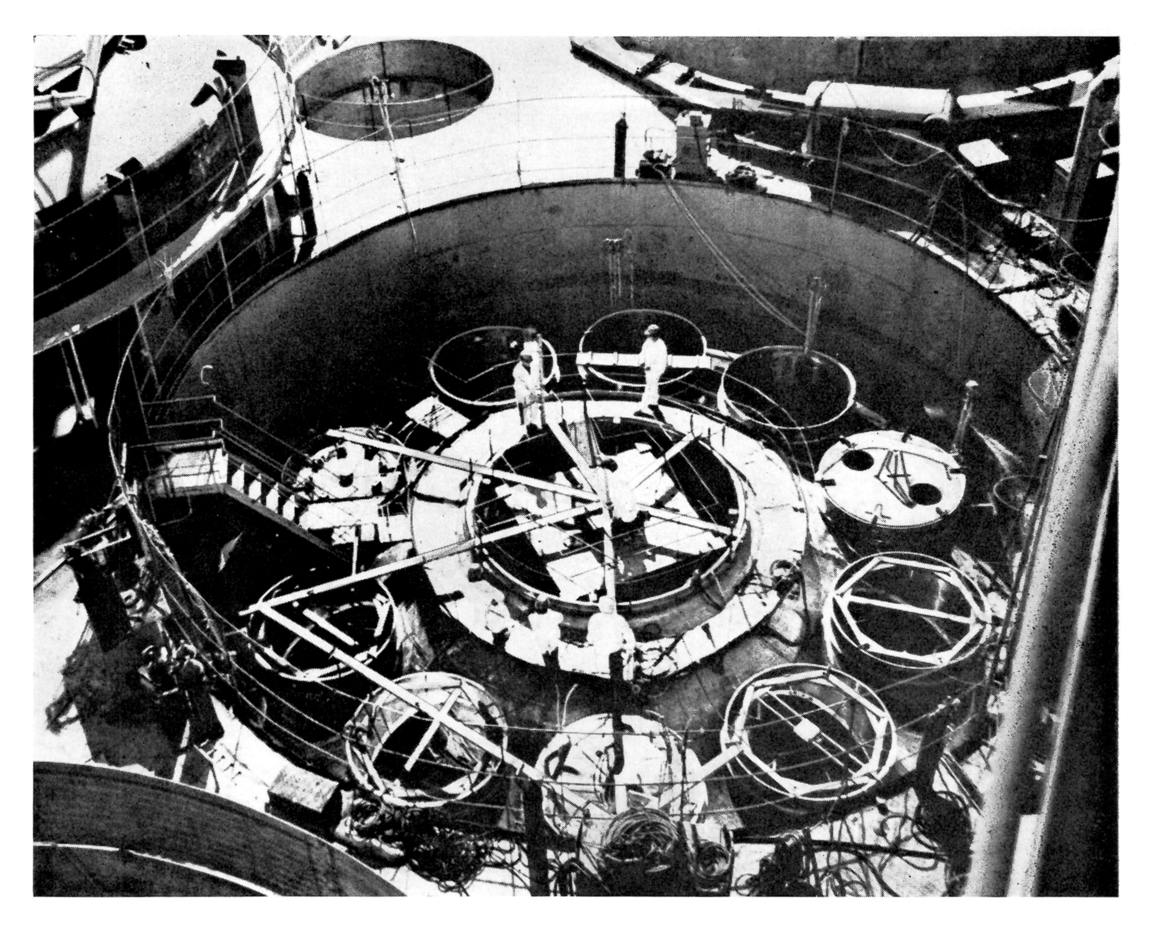
Warum Versuchskraftwerke?

Bei den ersten Versuchs- und Industriekernkraftwerken wird noch nicht in erster Linie angestrebt, ein Optimum hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und der Bruteigenschaften zu erreichen. Die Aufgabe besteht vielmehr darin, Konstruktionsfragen der zwei bisher vorgeschlagenen Ausführungen zu überprüfen und Betriebserfahrungen zu sammeln. Erste Ergebnisse zeigen, daß die wichtigsten Ausrüstungen des BN 600 für den Bau von serienmäßigen schnellen Kernkraftwerken der ersten Generation geeignet sind und die Grundlagen für gute Brutraten und ökonomische Kenndaten bilden.

Untersuchungen haben ergeben, daß die Wirtschaftlichkeit für größere schnelle Brutreaktoren besser wird. Deshalb ist die Steigerung der elektrischen Leistung einzelner Reaktoren auf 1500 bis 2000 MW vorgesehen. In der Sowjetunion werden zur Zeit Vorentwürfe solcher Reaktoren auf längere Sicht durchgearbeitet.



114 Modell des bei Kalkar (BRD) in Bau befindlichen 300-MW(el)-Kernkraftwerkes mit einem schnellen natriumgekühlten Reaktor



115 Montagearbeiten am schnellen Reaktor BN-600 [600 MW(el)], der als 3. Block im Kernkraftwerk Belojarsk (UdSSR) errichtet wird

Das bedingt umfangreiche Entwicklungsarbeiten, denn schon bei 1000 MW(el) wird das Spaltzonenvolumen etwa 5000 l groß sein und die kritische Masse die Größenordnung 3000 kg haben, wenn Plutonium als Brennstoff verwendet wird.

Nachweis für Zuverlässigkeit

Erfolgreich verlief bisher auch die Entwicklung schneller Systeme in Frankreich. Beim Reaktor Phenix wurde der kommerzielle Betrieb bei voller Leistung innerhalb von fünf Jahren nach Baubeginn erreicht. Er verlief nahezu störungsfrei bei einer mittleren Verfügbarkeit von 80 %. Die Nichtverfügbarkeit war hauptsächlich durch die Brennelementwechselperiode bedingt. In der Spaltzone war bisher nur ein Brennstab defekt. Phenix hat damit wohl recht augenfällig die Zuverlässigkeit der Natriumbrüter im Kraftwerksbetrieb nachgewiesen. Der Bau eines Superphenix mit 1200 MW(el) soll begonnen werden.
In Großbritannien, in der BRD und in den USA sind Demonstrationskraftwerke von 1300 bis 1500 MW(el) in der Planung. Der Beginn der Realisierung wird aber erst nach 1980 erwartet.

Schwerpunkte der Forschung

Natriumtechnologie

Es erinnert sich wohl jeder aus der Schulzeit daran, wie aggressiv Natrium mit Wasser reagiert. Deshalb müssen die Kreisläufe, in denen das flüssige Natrium sich bewegt, sehr gut abgedichtet sein. Insbesondere in den Dampferzeugern, in denen die aus der Spaltzone abgeführte Wärme auf das Wasser übertragen wird, können selbst kleinste Lecks nicht zugelassen werden. Hier gab es bisher in allen Ländern die meisten Schäden. So konnte keine der gewählten Dampferzeugerbauarten die betriebstechnische Eignung für zukünftige Großanlagen nachweisen, obwohl für kleinere Systeme schon recht gute Erfolge erzielt werden konnten. Deshalb ist die Natriumtechnologie, die zur Zeit sozusagen das Nadelöhr für die großtechnische Einführung der schnellen Reaktoren darstellt, ein Schwerpunkt der Arbeit vieler Forschungsinstitute.

Verdopplungszeit

Ein reales, aber langfristiges Ziel sind Verdopplungszeiten des Brennstoffs von etwa 5 Jahren. Diese können erreicht werden durch kurze Verweilzeiten zur Wiederaufarbeitung des Brennstoffs außerhalb des Reaktors von nur einem halben Jahr, die Vervollkommnung der Spaltzonenkonstruktion hinsichtlich größerer Kompaktheit und gleichmäßigerer Leistungsdichte sowie der Entwicklung verbesserter Brennelemente mit höherer Brennstoffdichte.

Die Brennelemente schneller Systeme müssen erst dann dem Reaktor entnommen werden, wenn Materialschäden durch Bestrahlung oder nicht zulässige Veränderungen der Struktur infolge der Einlagerung von Spaltprodukten zu befürchten sind (s. S. 156). Deshalb liegt hier zur Erhöhung des Abbrandes und zur Verbesserung der Brennstoffökonomie ein weites Betätigungsfeld für die werkstoffkundliche Forschung und Technologie mit großen Entwicklungsmöglichkeiten vor.

Hoher Abbrand angestrebt

Wegen des großen Spaltstoffeinsatzes in schnellen Systemen sind wirtschaftliche Stromerzeugungskosten nur bei hohen Abbränden und hoher mittlerer spezifischer Wärmeleistung (je Tonne Brennstoff in MWd/t) möglich.

Die bisher erreichten maximalen Abbrände stimmen ungefähr mit den angestrebten mittleren Werten für spätere wirtschaftliche Reaktoren von 80000 bis 100000 MWd/t überein. Sehr gute Ergebnisse hinsichtlich der Brennelementerprobung erzielte man am französischen Reaktor Rapsodie. Bei einem maximalen Abbrand von 178000 MWd/t zeigten von 20000 bestrahlten Stäben nur 25 einen Defekt, das sind nur 0,13%.

Dünne Brennstäbe

Die maximalen spezifischen Wärmeleistungen sind etwa doppelt so groß wie beim DWR. Derartig hohe thermische Belastungen sind nur mit relativ dünnen Brennstäben möglich. Geeignet sind Außendurchmesser von 6 bis 8 mm bei Wanddicken für die Hüllrohre von 0,4 bis 0,7 mm. Der wirtschaftlich optimale Wert hängt u. a. von den spezifischen Brennelementherstellungskosten (je Kilogramm Uran und Plutonium) ab. Die optimale Brennstabdicke fällt um so größer aus, je höher die spezifischen Fabrikationskosten sind, denn wenige dicke Stäbe sind bei gegebener Masse herstellungsmäßig billiger als viele dünne. Die höchsten räumlichen Leistungsdichten liegen bisher bei einigen hundert Kilowatt je Liter Kernvolumen.

Die Konstruktion der Brennstäbe ist im Prinzip der Lösung für den Druckwasserreaktor sehr ähnlich. Die Wärmeleitfähigkeit des hauptsächlich verwendeten Uranoxids ist zwar relativ klein, doch wird dieser Nachteil durch den hohen Schmelzpunkt mehr als wettgemacht. Einige ungelöste Probleme gibt es noch durch das Schwellen des Brennstoffs und den chemischen Angriff von Spaltprodukten auf das Material der Hüllrohre bei hohen Abbränden.

Verbesserung des Brutfaktors

Als eine der vielen Möglichkeiten zur Verbesserung des Brutfaktors schneller Reaktoren wird oft die Verwendung neuer Brennstoffarten, wie Karbide, Nitride oder metallischer Legierungen, vorgeschlagen. Der Effekt beruht z. B. beim Urankarbid auf dem Unterschied hinsichtlich der elastischen Streuung der Neutronen an den Kernen des Kohlenstoffs und des Sauerstoffs. Das Uran-

karbid hat außerdem mit 0,23 W/cm · K eine wesentlich höhere Wärmeleitfähigkeit als das Uranoxid (0,036 W/cm · K), doch stehen seinem Einsatz noch technologische Schwierigkeiten entgegen, z. B. das Wandern von Kohlenstoff in das Hüllmaterial.

Obwohl die Zweckmäßigkeit der Suche nach neuen Brennstoffen außer Zweifel steht, sind die Möglichkeiten des bisher verwendeten oxidischen Brennstoffs bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Insbesondere ist zu berücksichtigen, daß jeder neue Brennstoff auch eine neue Wiederaufbereitungstechnologie erfordert, während für die Wiederaufbereitung oxidischer Brennstoffe weitgehend Technologien vorhanden sind.

Störfallanalysen

Wie schon immer in der Geschichte der Entwicklung der Kerntechnik steht die Sicherheit nach wie vor im Mittelpunkt des Interesses. Auch für schnelle Reaktoren werden sehr sorgfältig die möglichen Störquellen und ihre Auswirkung auf das Gesamtverhalten des Systems untersucht und die Folgen für das Betriebspersonal und die Umgebung ermittelt. Aus diesen Arbeiten ergeben sich auch die Kriterien für die Entwicklung von Kontroll- und Steuereinrichtungen zur Betriebsführung sowie für die automatische Überwachung der gesamten Anlagen.

Derartige Störfallanalysen vermitteln auch Angaben über einen unkontrollierten Anstieg der Reaktorleistung. Man wendet strengste Maßstäbe an und geht jetzt bei diesen hypothetischen Untersuchungen von der Annahme des äußerst unwahrscheinlichen Falles aus, daß bei einem Reaktivitätsanstieg alle technischen Sicherheitseinrichtungen versagen und der dadurch unkontrollierte Leistungsanstieg erst bei Zerstörung von Teilen der Spaltzone notwendigerweise unterbrochen wird. Detaillierte Nachweise über den Verlauf und die Beherrschung dieses Störfalles werden verlangt.

Diese Forderungen stellen jedoch den schnellen Brüter nicht grundsätzlich in Frage. Bisher wurden gegen alle in der Kerntechnik betrachteten Störfälle technische Maßnahmen zu ihrer Beherrschung gefunden und sind für diesen Fall auch schon weitgehend bekannt. Es wird aber noch einige Jahre dauern, bis sich international auf diesem Gebiet sicherheitstechnische Standardlösungen durchsetzen, wie sie sich bei Druckwasserreaktoren für die Beherrschung des größten anzunehmenden Unfalls (GAU) eingebürgert haben.

Gasgekühlte Brüter

Bisher wurden nur die Brüter mit Natriumkühlung betrachtet. Wenn es sich herausstellt, daß die angestrebten Brutraten und Verdopplungszeiten mit diesem Typ nicht zu erreichen sind, werden gasgekühlte schnelle Reaktoren mehr in den Blickpunkt rücken. An der Entwicklung derartiger Reaktoren wird in einigen Ländern schon auf weite Sicht gearbeitet, da sie manchen Vorteil gegenüber dem Natriumbrüter in Aussicht stellen, vor allem eine höhere Brutrate infolge eines härteren Neutronenspektrums. Die Entwicklung ist aber noch nicht soweit gediehen, daß sie für die erste Generation wirtschaftlicher schneller Leistungsreaktoren, die um 1990 erwartet wird, eine Alternative zu den Brutreaktoren mit Natriumkühlung darstellen werden.

Kernenergetik – ein neuer Industriezweig

13

Elektroenergie im Vormarsch

Höchste Zuwachsrate

»Die universelle Umformbarkeit und die hohe Produktivität machen die elektrische Energie zur Energieform mit den höchsten Zuwachsraten. Der Gesamtenergiebedarf der Welt verdoppelt sich etwa alle zwanzig bis dreißig, der an Elektroenergie hingegen bereits aller zehn bis zwölf Jahre.« So war es kein Zufall, daß man bei neuen Energiequellen, wie der Kernenergie, zuerst an einen Beitrag zur Elektroenergiewirtschaft dachte.
Am 27. Juni 1954 wurden in der Sowjetunion die ersten 5 MW elektrische Leistung aus einem Kernkraftwerk an das Verbrauchernetz angeschlossen. Die weitere Entwicklung verlief verhältnismäßig gleichmäßig. Mitte 1976 z. B. gab es in der Welt 168 Kernkraftwerke mit insgesamt 79075 MW (el) und 195 Bauvorhaben mit einer projektierten Leistung von insgesamt 175751 MW (el). Weitere 152 Anlagen mit rund 150000 MW(el) waren bestellt. Die existierenden Kernkraftwerke, die mit wenigen Ausnahmen alle Elektroenergie erzeugen, deckten 1976 erst etwa 2 % des Energiebedarfs der Welt. Die Zahlen der in Bau befindlichen Anlagen und die weiteren Pläne zeigen jedoch, daß die Kernenergie in allen Industrieländern in ständig wachsendem Maße zur Erzeugung von Elektroenergie eingesetzt wird.

Strom aus Kernkraftwerken wird billiger

Das anfängliche Ziel, in Kernkraftwerken die Stromerzeugungskosten von Kohlekraftwerken zu erzielen, ist inzwischen erreicht. Es läßt sich bereits heute absehen, daß nach einer weiteren zehn- bis zwanzigjährigen Entwicklungsphase Elektroenergie in Kernkraftwerken billiger hergestellt werden kann.
Der zuerst zur industriellen Reife entwickelte Druckwasserreaktor ist gegenwärtig in den Kernkraftwerken eindeutig der Favorit, denn mit der großtechnischen Realisierung der Projekte für Hochtemperaturreaktoren ist nicht vor Mitte der achtziger Jahre zu rechnen. Die schnellen Brutreaktoren werden erst nach 1990 einen wesentlichen Beitrag liefern.

Kombination bietet Vorteile

In Zukunft wird bei der Auswahl des Reaktortyps neben den Stromerzeugungskosten eine wesentliche Rolle spielen, mit welcher Effektivität der Kernbrennstoff im Reaktor genutzt wird. Es ist das allgemeine Ziel, eine Kombination solcher Reaktortypen anzustreben, die sich hinsichtlich des Brennstoffes gegenseitig ergänzen und mit dem geringsten zusätzlichen Aufwand eine möglichst vollständige Nutzung der natürlichen Kernbrennstoffvorräte gewährleisten. In

diesem Sinne könnte ein ausgewogenes dynamisches System verwirklicht werden, in dem die Druckwasserreaktoren neben den Hochtemperaturreaktoren und besonders den schnellen Brütern einen bestimmten Platz einnehmen.

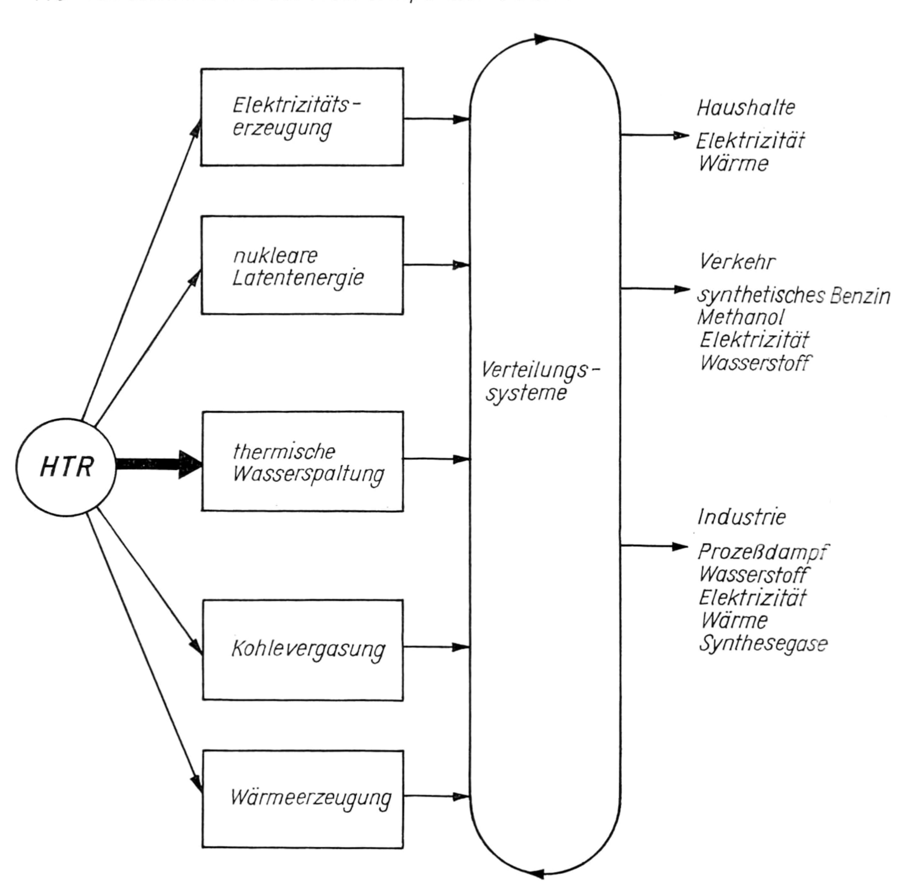
Alles braucht Wärme

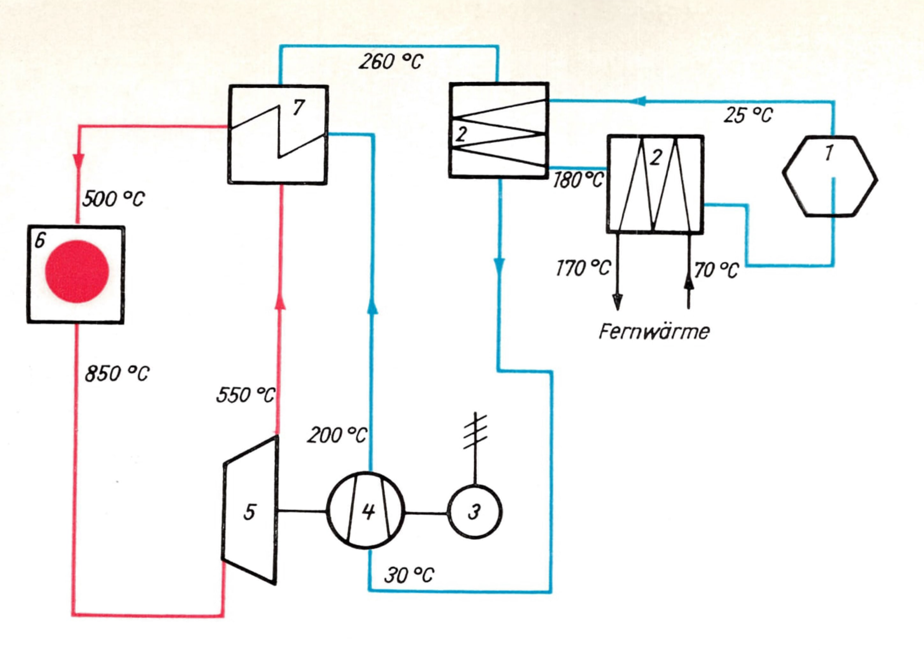
Bei Kernkraftwerken hatte man zuerst nur an die Erzeugung von Elektrizität gedacht. Heute wird mehr und mehr die Möglichkeit ins Auge gefaßt, die durch die Kernspaltung erzeugte Wärme direkt zu nutzen. Diese Entwicklung wird uns klar, wenn wir die heutige Aufteilung des Energieverbrauchs betrachten. Der größte Anteil der an die Endverbraucher abgegebenen Energie wird für die Heizung von Räumen, zum Erwärmen von Wasser und zur Versorgung von industriellen Prozessen verbraucht. Nur etwa ein Viertel wird zur Erzeugung von Licht und Kraft genutzt. Es erscheint daher wünschenswert, neue nukleare Technologien beschleunigt zu entwickeln, die den vielfältigen Anforderungen an Elektro- und Wärmeenergie genügen könnten. Eine aussichtsreiche Möglichkeit hierzu bieten Verfahren, die mit einem Hochtemperaturreaktor gekoppelt sind. Bild 116 vermittelt uns eine allgemeine Übersicht der Einsatzmöglichkeiten des HTR.

Hohe Temperatur erwünscht

Es wird noch im Zusammenhang mit anderen Kraftwerken (s. S. 208) erörtert, daß ein günstiger Gesamtwirkungsgrad (etwa 97%) durch die Wärme-Kraft-Kopplung erreicht wird. Das gleiche gilt auch für ein HTR-Kraftwerk. Vorteilhaft

116 Einsatzbereiche des Hochtemperaturreaktors





117 Schaltung einer Anlage mit Heliumturbine im 1. Kreislauf eines Hochtemperaturreaktors zur Erzeugung von Strom und Heizwärme
1 *Kühlturm;* 2 *Wärmetauscher;* 3 *Generator;* 4 *Verdichter;* 5 *Turbine;* 6 *Reaktor;* 7 *Rekuperator*

ist hier das hohe Temperaturniveau des Kühlmittels Helium nach Verlassen des Reaktors. Es kann mit mindestens 850 °C bei einem Druck von 1 MPa schon sicher gerechnet werden. Dadurch können nach dem Wärmetauscher im zweiten, mit Wasser betriebenen Kreislauf konventionelle Dampfturbinen eingesetzt werden, und man ist nicht mehr, wie beim Druckwasserreaktor, auf Sattdampfturbinen angewiesen. Bei einer angenommenen Vorlauftemperatur von 145 °C (Rücklauf 70 °C) für die Nutzung als Fernwärme ist bei einer entsprechenden Gesamtleistung z. B. eine Aufteilung in 784 MW elektrische Leistung und eine Fernwärmemenge von 2126 MW zu verwirklichen.

Turbine im ersten Kreislauf

Vom technischen und wirtschaftlichen Standpunkt interessanter ist die Kopplung eines HTR mit einer Heliumturbine. Auf diese Weise kommen die Vorteile des HTR erst richtig zur Geltung. Das Kühlmedium Helium treibt hier direkt die Turbine an und erhitzt dabei allerdings ihre Schaufeln auf helle Rotglut (Bild 117). Der Wirkungsgrad der Elektrizitätserzeugung liegt jedoch höher als bei Dampfturbinen. Das hohe Temperaturniveau bei der Wärmeabgabe ermöglicht die unmittelbare Nutzung der Abwärme für Heizzwecke. Die Wärme wird dabei aus dem Kühlwasserkreislauf über Wärmetauscher ausgekoppelt. Bei einer elektrischen Leistung von 1000 MW (Wirkungsgrad 36 %) ergibt sich eine Abwärme von etwa 1780 MW. Mit den Wassertemperaturen in Bild 117 könnten etwa zwei Drittel der Abwärme (1150 MW) für die Fernwärmeversorgung genutzt werden.
Große Anforderungen wird es künftig für die direkte Versorgung von industriellen Prozessen mit Wärme aus Kernkraftwerken geben.

Kohlevergasung

So existieren derzeit für die Kohlevergasung eine Reihe von Verfahren mit unterschiedlichem Entwicklungsstand. Hinsichtlich der Einkopplung von nuklearer Wärme aus Hochtemperaturreaktoren werden einige Prozesse für sehr aussichtsreich gehalten. Die folgenden zwei Verfahren werden besonders intensiv verfolgt:
– Wasserdampfvergasung von Kohle in einem Wirbelbettreaktor. Dabei soll mit

dem aus dem Kernreaktor austretenden heißen Helium Heißdampf erzeugt werden, der in einem Wirbelbett die staubförmige Kohle vergast. Bei einem Druck von 7 MPa ist für Steinkohle eine mittlere Temperatur von 1050 °C erforderlich, für Braunkohle sind schon 900 °C ausreichend.
– Hydrierende Vergasung von Kohle. Dabei soll die Kohle mit einem Gemisch von Wasserdampf und Wasserstoff vergast werden. Der benötigte Wasserstoff könnte dadurch erzeugt werden, daß Methan in einem Röhrenspaltofen unter Verwendung von Kernreaktorwärme mit Wasserdampf gespalten wird.
Gegenüber den nichtnuklearen Vergasungsverfahren lassen sich die Vorteile vor allem in einem höheren Wirkungsgrad des Gesamtprozesses und im viel besseren Ausnutzen der fossilen Energiereserven begründen. Ein Zahlenbeispiel soll uns das verdeutlichen. Für 1000 Standardkubikmeter Methan werden benötigt:

– beim konventionellen autothermen Verfahren
  1,8 t Kohle 3,2 t Wasser 0,9 t Sauerstoff

– mit Kernreaktorwärme
  1,1 t Kohle 2,9 t Wasser 21,7 GJ Kernwärme

Könnte die Vergasung unter der Erde direkt vor Ort stattfinden, hätte das viele Vorteile. Ein HTR könnte den gesamten Prozeß mit Wärme versorgen und außerdem noch Elektrizität erzeugen.

Wasserstofferzeugung

Für den Einsatz eines Hochtemperaturreaktors zur Wasserstofferzeugung bieten sich zwei Möglichkeiten an:

– die elektrolytische Zerlegung von Wasser,
– die thermische Wasserzerlegung.

Bei der Elektrolyse wäre das Problem auf eine nukleare Stromerzeugung reduziert. Da der gesamtenergetische Wirkungsgrad dieses Verfahrens jedoch sehr niedrig liegt, würde eine Produktion von Wasserstoff auf diese Weise sehr teuer.
Eine nennenswerte thermische Dissoziation von Wasser tritt erst oberhalb von 5000 °C auf. Glücklicherweise kann diese Temperatur durch sogenannte Reaktionsmittler auf etwa 1000 °C herabgesetzt werden. Damit kommt man in Bereiche, die von einem HTR noch bewältigt werden könnten. Aus energetischer Sicht ist die Thermolyse des Wassers zum Erzeugen von Wasserstoff und Sauerstoff ein Verfahren zur direkten Umwandlung von Wärmeenergie in chemische Energie. Es befindet sich jedoch noch im Entwicklungsstadium. Insbesondere wird nach günstigeren Reaktionsmittlern gesucht, die bei reaktortechnisch beherrschbaren Temperaturen und Drücken hinreichende Umsätze gewährleisten.

Speicher zum Lastausgleich

Wasserstoff ist ein hocheffektiver Energieträger, günstig in solchen Situationen, in denen der Energietransport als Elektrizität ineffektiv, unpraktisch oder unmöglich ist. Diese Eigenschaft hat das weite Interesse für die Möglichkeit der Wasserstoffwirtschaft erweckt. Ebenso wie gasförmige Brennstoffe kann auch Wasserstoff gespeichert werden und bietet daher gegenüber der Elektrizität als Energieträger wesentliche Vorteile hinsichtlich der Anpassung an die Schwankungen des Verbrauchs.
Gegenwärtig haben die größten Kraftwerke schon elektrische Leistungskapazitäten von über 1000 MW. Aus ökonomischen Gründen könnte die maximale Größe bis zu 5000 MW anwachsen. Die Energieerzeugungskosten je Megawatt von derartig großen Anlagen werden wegen der relativ geringeren Investitionskosten kleiner. Der Vorteil geht weitgehend verloren, wenn auf Grund der starken Bedarfsschwankungen zwischen Sommer und Winter sowie zwischen Tag und Nacht diese großen Kraftwerke mit einer geringen Last arbeiten müßten. Deshalb wird die Entwicklung von Systemen zur Energiespeicherung in den Zeiten mit geringerem Bedarf und zur Energieverteilung immer dringender. Es könnte

dabei Wasserstoff als Energiespeichermedium und auch als Sekundärenergieträger verwendet werden.
Es werden verschiedene Projekte für den Einsatz der Kernenergie in Verbindung mit der Wasserstoffwirtschaft erwogen. Günstige Aussichten hat eine Kombination von Hochtemperaturreaktoren mit Gaskühlung und schnellen Brutreaktoren. Die HTR könnten Wasserstoff, Elektrizität und Prozeßwärme für die Industrie und die Raumheizung, die SBR Elektrizität und neues spaltbares Material produzieren. Im Gleichgewicht benötigt ein derartiges System keine Isotopentrennungsanlage und verarbeitet das natürliche Uran und das Thorium nahezu vollständig.

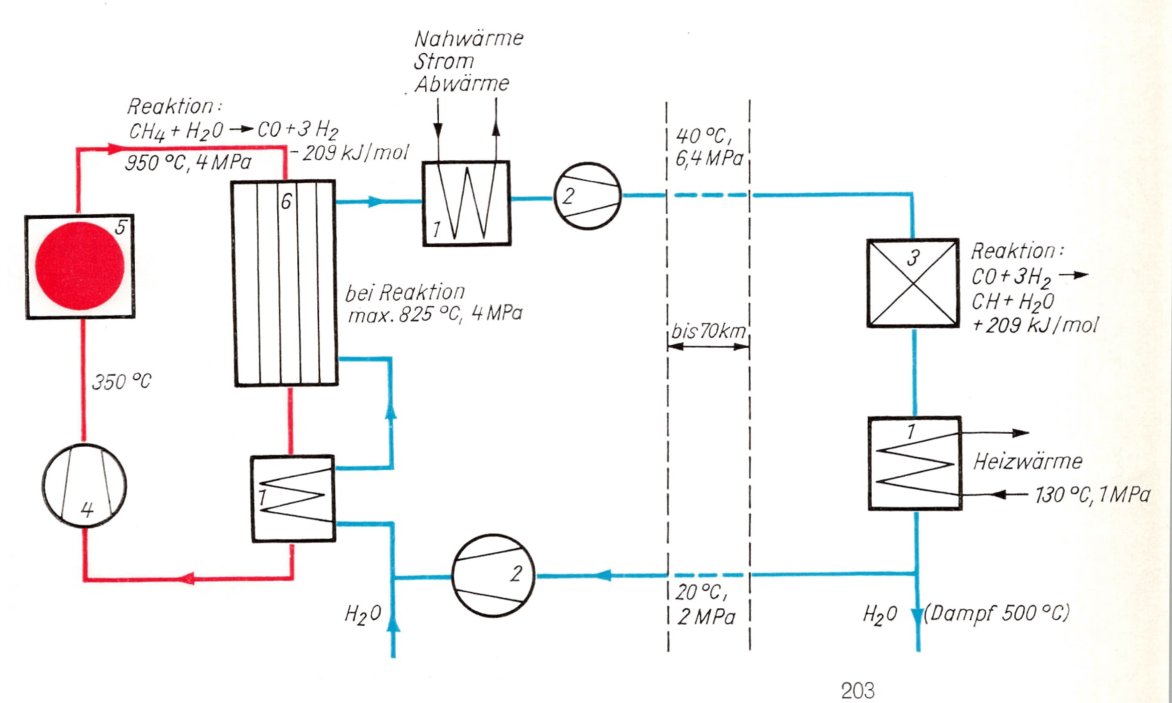
Interesse der Stahlindustrie

In der Stahlindustrie gibt es Direkt-Reduktions-Verfahren. Das sind Verfahren, die nicht an Koks gebunden sind und bei denen die Eisenerzreduktion z. B. mit einem Wasserstoff-Kohlenmonoxid-Gemisch außerhalb des Hochofens stattfindet. Man vermeidet auf diese Weise die Umweltbelastung durch Kokereien und ist nicht mehr auf das an Koks gebundene Hochofenverfahren mit einem relativ hohen spezifischen Energieverbrauch angewiesen. Die Zukunft der neuen Verfahren hängt in erster Linie davon ab, ob das Reduktionsgas in genügend großen Mengen zu wirtschaftlichen Preisen angeboten werden kann. Im zweiten Produktionsschritt wird der zuerst erzeugte Eisenschwamm vorteilhaft in Elektrolichtbogenöfen weiterverarbeitet. Ein HTR kann beide hier benötigten Energieformen im Verbund anbieten, einmal die Prozeßwärme auf hohem Temperaturniveau zur Reduktionsgaserzeugung und zum anderen den Strom zur Elektrostahlherstellung. Es werden für das Schachtofenprinzip mit Kohlenmonoxid und Wasserstoff wesentliche Energieeinsparungen gegenüber der Koksmetallurgie angegeben.

Nukleare Fernenergie

Seit einiger Zeit wird auch in Tageszeitungen hin und wieder über Untersuchungen zur nuklearen Fernenergie berichtet. Ohne nähere Erläuterung

118 Fernenergie aus dem Kreislauf Methan-Synthesegas mit einem Hochtemperaturreaktor als Wärmequelle
1 *Wärmetauscher;* 2 *Kompressor;* 3 *Methanerzeuger;* 4 *Gebläse;* 5 *Reaktor;* 6 *Röhrenspaltofen*



könnte man bei diesem Begriff an eine besonders weitreichende Form der Kernenergie denken. Doch das ist damit nicht gemeint. Es geht vielmehr darum, daß mittels nuklearer Wärme Gase erzeugt werden, die man durch Rohrleitungssysteme über große Entfernungen zu den Verbrauchern transportiert. Dort könnte die am Standort des Kernreaktors eingesetzte Wärme durch eine chemische Reaktion wieder zurückgewonnen werden. Für diesen Zweck verwendbar ist der Prozeß der Methanspaltung:

$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2 - 232$ kJ/mol.

Die Reaktion ist reversibel, wenn geeignete Katalysatoren zur Verfügung stehen. Dann werden Kohlenmonoxid und Wasserstoff in Methan und Wasserdampf zurückgebildet, wobei die eingekoppelte Wärme freigesetzt wird. Schon heute werden bei der Methanisierung Temperaturen von 450 °C erreicht. Das genügt, um auf diese Weise den Heizwärmebedarf vieler Haushalte und einen großen Teil des Prozeßwärmebedarfs der Industrie und von Kleinverbrauchern in dicht besiedelten Gebieten abzudecken, die als Standort für einen Kernreaktor ungeeignet sein könnten.

Fließschema der Wärmeversorgung

Das erzeugte Methan wird über Rohrleitungen wieder zum HTR zurückgeführt und in den Methanspaltungsprozeß eingeschleust. Man erkennt das Fließschema des Kreislaufs Methan-Synthesegas aus dem Bild 118. Je nach Schaltung kann ein Anteil von 50 bis 75% der thermischen Reaktorleistung in Fernenergie umgesetzt und der Rest in der Nähe des Reaktors zum Bereiten von Heißwasser verwendet werden. Abgesehen von Leckverlusten verbraucht das Verfahren keine fossilen Rohstoffe und ist in der Lage, weit entfernte Verbraucher zu versorgen. Außerdem bietet es noch die Möglichkeit der Speicherung und ist auch aus diesem Grunde ein sehr vorteilhaftes Wärmeversorgungssystem. Gelingt es mit einem entsprechenden Katalysator die Gastemperatur auf 600 °C anzuheben, kann man Turbinendampf erzeugen und eine verbrauchernahe Stromerzeugung ermöglichen.

Nukleare Zentren

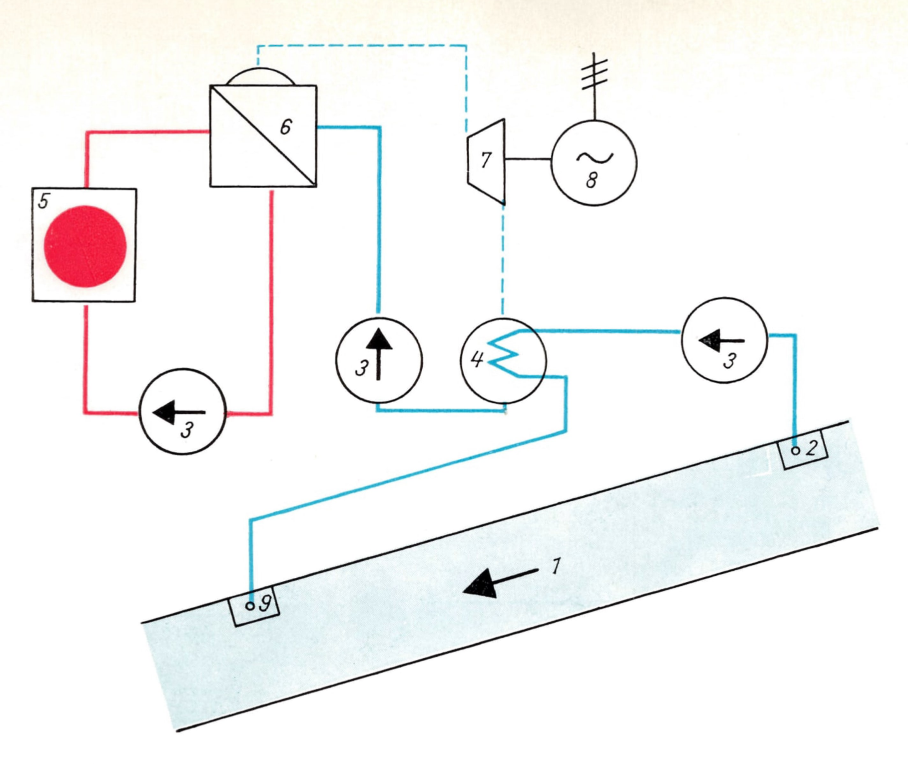
Die Erzeugungsanlagen der Fernenergie lassen die Bildung von nuklearen Zentren zu, so daß eine größere Kapazität an Reaktoren einschließlich ihrer Nebenanlagen, an einem für diese Anlagen optimalen Standort errichtet werden können. Falls solche Zentren mit einer eigenen Wiederaufbereitungsanlage für den Kernbrennstoff versehen werden, ergeben sich durch die kurzen Transportwege günstige ökonomische Bedingungen und höhere Sicherheiten bei der Handhabung größerer Mengen radioaktiver Substanzen.

Nutzung der Abwärme

In Zukunft werden uns nicht allein die Probleme der technischen Realisierung des Baus von Kraftwerken beschäftigen, sondern es müssen auch die geeigneten Standorte für die Kraftwerke ausgewählt werden. Dabei kommt in einigen Ländern für die Kernenergie erschwerend hinzu, daß bis heute noch in Teilen der Bevölkerung der Eindruck herrscht, von Kernkraftwerken gehe eine ähnliche Bedrohung wie von nuklearen Waffen aus.
Bei großen Kraftwerken treten neben den Sicherheitsaspekten immer mehr Fragen der Abwärme und der Kühlungstechnik in den Vordergrund, ähnlich wie bei den konventionellen Kraftwerken.

Frischwasserkühlung

Weit verbreitet ist heute die Frischwasserkühlung (Bild 119). Dabei wird das Kühlwasser nach einmaligem Gebrauch erwärmt in das Gewässer zurückgeleitet, aus dem es entnommen wurde. Das hat eine Erwärmung der Gewässer zur Folge, die bei Überschreitung gewisser Grenzen zu einigen Nachteilen führen kann. Einerseits sinkt mit steigender Temperatur die Aufnahmefähigkeit des Wassers für Sauerstoff, andererseits wird der Sauerstoffbedarf bei höheren Temperaturen immer größer. Das ist bedingt durch den vermehrten



119 Prinzip der Durchflußkühlung mit Frischwasser in einem Kernkraftwerk
1 *Fluß;* 2 *Kühlwasserentnahme;* 3 *Pumpe;* 4 *Kondensator;* 5 *Reaktor;* 6 *Dampferzeuger;* 7 *Turbine;* 8 *Generator;* 9 *Kühlwasserabgabe*

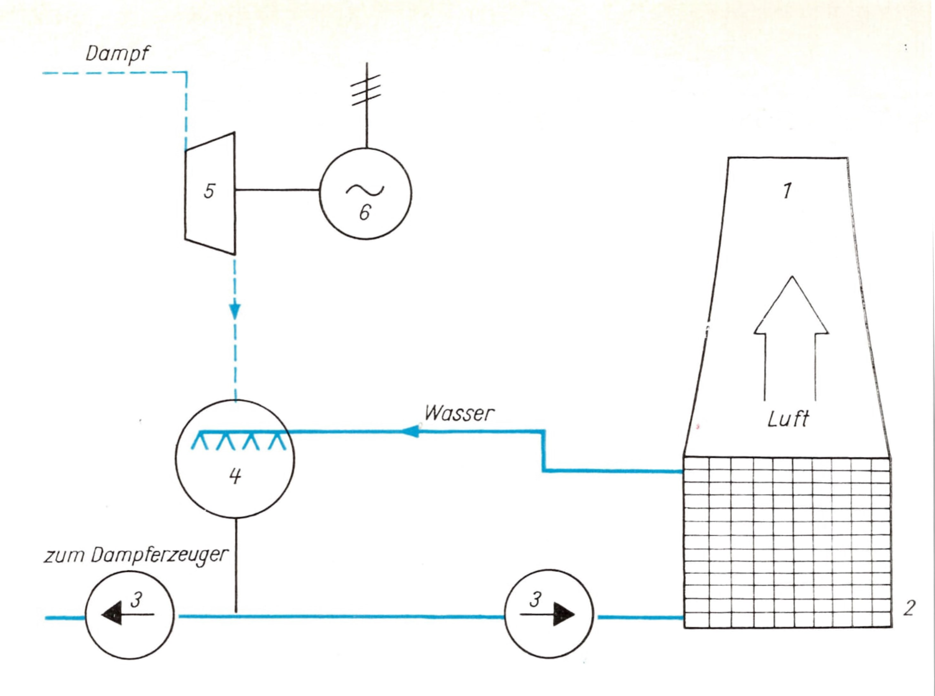
Verbrauch von Sauerstoff beim Abbau von biologischen Schadstoffen und die gesteigerte Lebensaktivität der Tier- und Pflanzenwelt.
Die Sauerstoffverminderung kann in dem betroffenen Wassersystem zu einem Fischsterben oder einer schädlichen Veränderung der Flora führen. Deshalb ist an Flüssen und Seen die Anwendung der Frischwasserkühlung nur beschränkt möglich, so daß man sich in Zukunft an immer mehr Kraftwerken zum Einsatz der kostenungünstigeren Naß- oder der Trockenkühlung gezwungen sieht.

Kühltürme mit Dampfschwaden

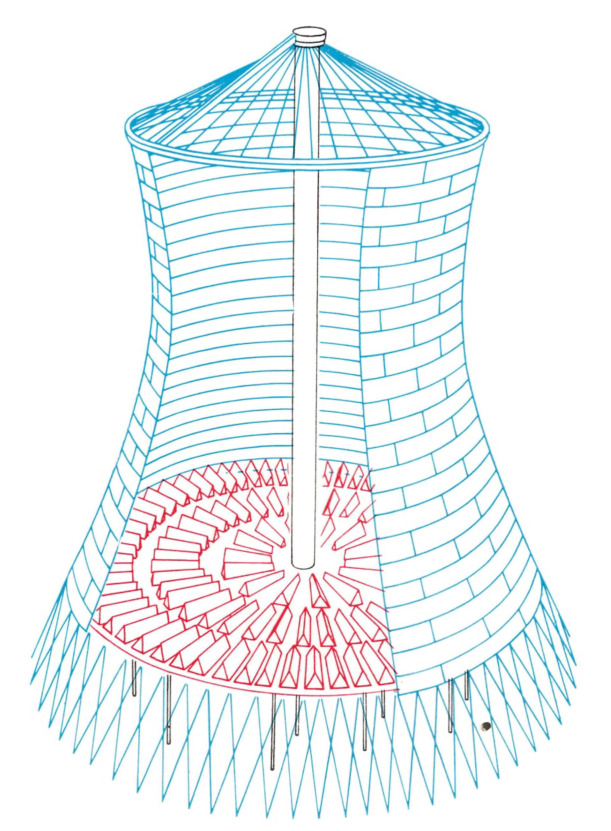
Das ist aber auch keine ideale Lösung, denn die für große Kraftwerke notwendigen riesigen Kühltürme passen oft schlecht in das Landschaftsbild. Außerdem tritt durch das in den Kühlturmeinbauten herunterrieselnde Wasser eine Niederschlagserhöhung in der Umgebung infolge des Ausregnens größerer Wassertropfen auf. Daher sind vor dem Bau derartiger Kühltürme landschaftliche und meteorologische Gutachten erforderlich.

Trockenkühlung ohne Wasserverlust

Die ersten konventionellen Wärmekraftwerke mit Kühltürmen ohne sichtbare Abluftfahne, d. h. mit Trockenkühlung, wurden vor etwa 15 Jahren ihrer Bestimmung übergeben. Die in der Zwischenzeit gewonnenen praktischen Erfahrungen ergeben, daß für größere Kraftwerke am besten das in Ungarn von Professor Heller entwickelte indirekte Verfahren geeignet ist. Der heiße Dampf wird dabei zwar durch Wasser gekühlt, dieses Kühlwasser zirkuliert jedoch in geschlossenen Kühlelementen und bleibt daher vollständig erhalten. Die Luft wird mittels Ventilatoren an den Kühlelementen vorbeigeblasen (Bild 120). Es werden gegenüber der Naßkühlung der 3- bis 4fache Luftdurchsatz und etwas größere Kühltürme benötigt (Bild 121). Das bedingt zwar höhere Investitionen, jedoch verursacht die aus dem Kühlturm entweichende Warmluft infolge des geringen Feuchtigkeitsgehaltes keine Umweltverschmutzung. Da es bei der Trocken-



120 Prinzip der Trockenkühlung
1 *Kühlturm;* 2 *Wärmetauscher;* 3 *Pumpe;* 4 *Einspritzkondensator;* 5 *Turbine;* 6 *Generator*



121 Moderner Trockenkühlturm mit Seilnetzkonstruktion und Verkleidung aus profilierten Aluminiumblechen

kühlung keinen Wasserverlust gibt, ist bei der Wahl dieser Technik der Standort von Kernkraftwerken auch nicht in die Nähe eines Flußlaufes oder der Meeresküste gebunden. Die Sowjetunion setzte als erstes Land in Bilibino ein derartiges System zur Kühlung eines Kernkraftwerkes ein.
Für die Zukunft werden Kraftwerkparks mit einer Leistung von etwa 10000 MW erwogen. Ein Vergleich der Leistungsfreisetzung von Kühltürmen bei solchen Komplexen mit natürlichen Wetterprozessen und ihren Entstehungsbedingungen zeigt, daß keine großräumigen Wetterbeeinflussungen, wie Tornado- oder Gewitterbildung, durch die Kühltürme zu erwarten sind. Es erscheint aber in jeder Hinsicht günstiger, alle Möglichkeiten für eine praktische Nutzung der Abwärme auszuschöpfen. Das Problem liegt vor allem darin, daß die Abwärme der heutigen Kraftwerke mit Kondensationsdampfturbinen bei einem Temperaturniveau von 25 °C bis 40 °C liegt. Für die unmittelbare Verwendung in Gebäudeheizungen, die mit 70 bis 100 °C warmem Wasser gespeist werden, kommt sie daher nicht in Frage. Große Wärmeverbraucher mit geringem Temperaturniveau werden deshalb gesucht. Die sinnvolle Verwendung der großen Abwärmemenge würden nicht nur den Wirkungsgrad des gesamten Prozesses erhöhen, sondern auch die Kraftwerke umweltfreundlicher gestalten.

Sinnvolle Nutzung gesucht

Landwirtschaftliche Nutzung

Die Landwirtschaft bietet vielfältige Möglichkeiten der Nutzung der Abwärme. Man kann Treibhäuser beheizen, den Boden im Freiland erwärmen oder mit warmem Wasser bewässern. Für die Tierzucht sind erwärmte Fischteiche oder beheizte Ställe nützlich. Gute Erfahrungen sind über die Aufzucht von Spiegelkarpfen in ganzjährig beheizten Warmwasseranlagen bekannt geworden. Durch Ausschalten des Winters, in dem das Wachstum stagniert, konnte das gleiche Produktionsziel statt in 3 Jahren schon in fast 2 Jahren erreicht werden. Wenn der Sommer besonders warm ist, muß man selbstverständlich Ausweichlösungen bereit haben.

Wärmepumpe

Mit Hilfe der Wärmepumpe, die nach den gleichen physikalischen Prinzipien wie die Kältemaschine arbeitet, könnte durch mechanische Arbeit die Wärme von niedriger Temperatur auf ein höheres Temperaturniveau gebracht und so technisch besser verwertbar gemacht werden. Hallenbäder wären z. B. in diesem Fall ganzjährige Abnehmer mit großem Wärmebedarf. Eine Abschätzung des Aufwands zeigt, daß die Anwendung der Wärmepumpe im Hinblick auf Kostenersparnis und der Schonung von fossilen Brennstoffen durchaus sinnvoll ist.

Modellfeld

In der ČSSR ist ein Modellfeld für die Abwärmenutzung an einem 1000-MW-Kraftwerk berechnet worden. Es müßte nahezu 10 km² groß sein und sich in etwa 100 ha Treibhausfläche, 100 ha Bodenheizung mit Kunststoffabdeckung und 58 ha Freifeld mit Bodenheizung aufgliedern. Man rechnet bei Treibhäusern immerhin mit einer mittleren Erhöhung der Ernteerträge um das 5fache gegenüber dem Freiland. Auf dem Freifeld mit Bodenheizung sind mittlere Ertragssteigerungen von 40% zu erreichen. Es ist sicher schwierig, in der Nähe jedes Kraftwerkes solche großen landwirtschaftlichen Flächen zur Verfügung zu haben. Außerdem bedingen die erforderlichen ausgedehnten Rohrsysteme große Investitionen und sicher auch einige Korrosionsprobleme. Trotzdem erscheint es angebracht und verspricht in vieler Hinsicht Vorteile, wenn für bestehende und geplante Kraftwerksblöcke eine sinnvolle Verwendung der Abwärme angestrebt wird.

Heizung von Treibhäusern

Eine gute Lösung fanden sowjetische Wissenschaftler für das Kernkraftwerk Bilibino, das im Fernen Osten der Sowjetunion auf der Tschuktschenhalbinsel errichtet wurde. Ein Teil der produzierten Wärme wird dort großen Treibhauskomplexen zugeleitet und gewährleistet den ganzjährigen Gemüseanbau.
In der BRD rechnet man in den nächsten 10 Jahren mit etwa 30 großen Kernkraftwerken. Die entsprechenden Wärmelaufpläne zeigen, daß die zur Verfügung stehenden Gewässer nicht ausreichen, um das Problem Abwärme mit Hilfe der Frischwasserkühlung zu lösen. Man hofft hier ebenfalls auf eine land-

Großversuche laufen

wirtschaftliche Nutzung in Form der Freilandbeheizung. Bei Großversuchen im Rahmen des Systems »Agrotherm« wurden umfangreiche Rohrleitungsnetze in 75 cm Tiefe verlegt. Die Ertragssteigerungen bei Frühkartoffeln, Getreide und Gemüse waren zufriedenstellend und bestätigen den »gedämpften« Optimismus. Überraschend waren die geheizten Böden nicht trockener als die ungeheizten. Einige Fragezeichen gibt es noch im landwirtschaftlichen Bereich hinsichtlich der geeigneten Sorten, der zeitlich veränderten Fruchtfolge und möglicher neuer Schädlinge. Es wird angegeben, daß unter günstigen Bedingungen bis zu 4000 ha je Kraftwerk beheizt werden könnten.

Wärme-Kraft-Kopplung

Einen günstigeren Wirkungsgrad des Gesamtprozesses kann man für die kombinierte Elektro- und Wärmeenergieerzeugung für alle Kraftwerkstypen noch auf einem anderen Weg erreichen. Bei der sogenannten Wärme-Kraft-Kopplung wird den Turbinen vorzeitig Dampf unterschiedlicher Druckstufen für die Wärmeversorgung entzogen, der in dieser Form direkt genutzt werden kann. Ballungsräume der Industrie oder Zentren des Wohnungsbaus bieten sich als große Wärmeverbraucher an. Dabei spielt natürlich die beim Wärmetransport zu überbrückende Entfernung für die Wirtschaftlichkeit eine wesentliche Rolle. Als gutes Beispiel soll hier das Kohlekraftwerk Vockerode genannt werden, das nach dem Umbau einiger 32-MW-Kondensationsturbinen auf Entnahme-Kondensationsturbinen schon im Jahre 1976 durchschnittlich 105 Gigajoule Wärme je Stunde für die Fernwärmeversorgung von Dessau zur Verfügung stellte.
Insgesamt kann durch die Wärme-Kraft-Kopplung der Nutzungsgrad der eingesetzten Energie nahezu verdoppelt werden. Das bedeutet schon einen großen Fortschritt gegenüber dem konventionellen Kraftwerksprozeß, bei dem mehr als 60% der eingesetzten Primärenergie als »Wärmemüll« an die Umwelt abgegeben wird. Problematisch ist bei der Fernwärme derzeit noch der hohe Anteil (60 bis 75%) der Transport- und Verteilungskosten an den Wärmekosten für den Abnehmer. Hier muß noch eine Technik entwickelt werden, die diesen Anteil deutlich senkt.

Wohin mit den radioaktiven Abfällen?

Sichere Aufbewahrung

Ein entscheidendes Problem der kernenergetischen Entwicklung ist die sichere Lagerung radioaktiver Abfälle. Sicherheit bedeutet in diesem Zusammenhang Schutz des Grundwassers und des Untergrundes vor unzulässiger Verunreinigung. Mit der weiteren Inbetriebnahme von Kernkraftwerken und den notwendigen Folgeeinrichtungen zur Kernbrennstoffbearbeitung in den nächsten Jahrzehnten ist diese Frage auch in der DDR aktuell geworden.

Zentrale Lager

Größe und Gegebenheiten der DDR lassen es zweckmäßig erscheinen, die langfristige Lagerung radioaktiver Abfälle an einem zentralen Ort vorzunehmen, der hinsichtlich der geologischen und hydrogeologischen Voraussetzungen dafür geeignet ist. Damit entfällt für Kernkraftwerke und andere kerntechnische Einrichtungen die Notwendigkeit einer Endlagerung am Ort der Anlage, und die Auswahl der geeigneten Standorte wird einfacher. Für die Einrichtung einer Aufbewahrungsmöglichkeit müssen die zu erwartenden Mengen – gestaffelt nach der Aktivität – bekannt sein oder annähernd eingeschätzt werden können.
Unabhängig vom Reaktortyp und vom Kernbrennstoff entstehen je 1000 MW Wärmeleistung im Jahr etwa 260 kg Spaltprodukte. Die Eigenschaften der dabei hauptsächlich auftretenden Elemente finden wir in Tabelle 3.
Die Spaltprodukte verbleiben während des Reaktorbetriebes und auch nach der Entladung der Kernbrennstoffkassetten aus der aktiven Zone zum überwiegenden Teil im Gefüge des Spaltmaterials oder innerhalb der Brennstoffumhüllung. Daher fällt in Wiederaufbereitungsanlagen – dort werden die »abgebrannten« Kassetten zerlegt und der noch weiter zu verwendende Spaltstoff abgetrennt – der größte Teil des hochaktiven Abfalls an. Durch die dabei angewandten che-

Tabelle 3. Eigenschaften der wichtigsten Spaltprodukte

Isotop	Halbwertzeit	Anteil (%)	Flüchtigkeit	Siedepunkt	Gefährdete Organe (Art der Schädigung)	Chemische Form im Kreislauf	Ablagerungsneigung	Rückhaltemöglichkeit
Krypton 85	10,6 Jahre	0,3	gasförmig	–153 °C	alle Organe (äußere Strahlung)	Edelgas	keine	Tieftemperaturfallen
88	2,8 Stunden	3,6						
Strontium 89	50,5 Tage	4,8	mäßig	1366 °C	Knochen, Lunge (Nahrungsaufnahme, Inhalation)	atomar	groß	Ionenaustauschvorgänge; Adsorption
90	28 Jahre	5,8						
Jod 131	8 Tage	3,1	groß	185 °C	Schilddrüse (äußere Strahlung, Nahrungsaufnahme, Inhalation)	atomar, molekular, Jodid, organische Verbindung	groß	physikalische Adsorption; chemische Reaktion
132	2,3 Stunden	4,7						
133	21 Std.	6,9						
134	53 Min.	7,8						
135	6,7 Std.	6,1						
Xenon 133	5,3 Tage	6,6	gasförmig	–108 °C	alle Organe (äußere Strahlung)	Edelgas	keine	Tieftemperaturfallen
135	9,2 Std.	6,3						
138	17 Min.	5,5						
Zäsium 137	33 Jahre	6,2	mäßig	670 °C	alle Organe (Nahrungsaufnahme, Inhalation)	atomar	groß	Ionenaustauschvorgänge, Adsorption

mischen Prozesse bedingt, liegt der stark strahlende Abfall dann meist in Form von wäßrigen Lösungen vor. Die Flüssigkeiten lassen sich jedoch durch entsprechende Behandlung in feste, stabile und stark konzentrierte Produkte überführen.

Spaltprodukte

Es wird angegeben, daß für einen 1000-MWel-Reaktor im Jahr bei der Brennstoffaufbereitung etwa 2 m³ verfestigte Abfälle anfallen. Mittelaktive Reste werden durch Einbetten in Beton, Bitumen, Kunststoff und andere Stoffe fixiert und zur Lagerung vorbereitet. Da Abwässer mit geringer Radioaktivität in größeren Mengen anfallen, steht hier wiederum die Volumenverminderung im Vordergrund des Interesses.

Die Menge der Abfälle aus Kernkraftwerken, Forschungszentren und der Isotopenanwendung ist gering im Vergleich zu der aus Aufbereitungsanlagen.

Lagerungszeiten

Zur Endlagerung sind für Abfälle mit geringer und mittlerer Aktivität Zeiträume von mehreren Jahrzehnten bis einigen Jahrhunderten und für hochaktive Abfälle Zeiträume bis zu über tausend Jahren in Betracht zu ziehen. Abfälle mit kurzlebigen Aktivitäten werden in der anfallenden Form solange in sicheren Behältnissen aufbewahrt, bis die Radioaktivität abgeklungen ist. Nach genauer Überprüfung können sie dann wie normaler Müll behandelt werden.

Endlagerung in Salzformationen

Obwohl schon sehr unterschiedliche Konzepte für die Endlagerung entwickelt worden sind, haben sich die Arbeiten fast aller Länder in den letzten Jahren auf die Nutzung geologischer Formationen für diesen Zweck konzentriert. Insbesondere erscheinen Salzformationen auf Grund der Abgeschlossenheit vom Wasserkreislauf, der Plastizität des Salzgesteins und der guten Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu anderen Gesteinen als sehr gut geeignet.

Die Existenz der Salzlager ist an und für sich schon ein Beweis dafür, daß diese Lagerstätten geologisch über Jahrmillionen stabil und nicht mit Wasser in Berührung gekommen sind. Obgleich man für stark radioaktive Abfälle mit großer Halbwertszeit sichere Schutzbehälter vorgesehen hat, interessiert doch die Ausbreitung strahlender Stoffe in geologischen Formationen über längere Zeiträume hinweg.

Prähistorischer Reaktor

In diesem Zusammenhang ist ein sonderbarer Fall bekannt geworden. In der Uranlagerstätte in Oklo in Gabun hat sich vor 1,7 Milliarden Jahren, als die Konzentration des Uran 235 im Natururan noch etwa 3% betrug, in den sehr reichen Uranerzen eine natürliche Kettenreaktion ereignet, vermutlich durch den Eintritt von Wasser. Dieser prähistorische Siedewasserreaktor scheint längere Zeit in Betrieb gewesen zu sein. Als Ergebnis dessen finden wir dort heute stellenweise Natururan mit einer Uran-235-Konzentration unter 0,7%, offensichtlich ein Resultat des Abbrandes. Außerdem gibt es auch Natururan mit höherem Uran-235-Gehalt, das als Zerfallsprodukt des seinerzeit gebildeten Plutoniums identifiziert werden konnte.

Für uns besonders interessant ist jedoch das Verhalten der Spaltprodukte, die sich inzwischen längst in stabile Substanzen umgewandelt haben. Wesentlich ist die Entdeckung, daß sie in der langen Zeit seither nur einige Meter vom Ort der Entstehung gewandert sind. Das bestätigt ein beträchtliches Rückhaltevermögen von bestimmten geologischen Schichten.

In vielen Ländern – auch in der DDR – werden aus den genannten Gründen stillgelegte Salzbergwerke für die Lagerung eingerichtet (Bild 122). Bei Gewährleistung der Bergsicherheit und der Trockenhaltung der Grube kann mit großer Wahrscheinlichkeit ein Austritt radioaktiver Stoffe aus dem Einlagerungsbereich ausgeschlossen werden. Die Umwelt wäre nur dann gefährdet, wenn in das Bergwerk Wasser eindringt, das aus dem Abfall radioaktive Stoffe auslaugen kann und als verunreinigte Salzlösung in genutzte Grundwasser eindringt. Im Rahmen des Genehmigungsverfahrens für die Inbetriebnahme einer Grube werden deshalb Untersuchungen zur Geologie, Hydrogeologie, Gebirgsmechanik und Seismik ausgeführt, die eine ausreichende Bergsicherheit für die in Betracht kommende Zeit nachweisen müssen.

Wasser bedeutet Gefahr

In der BRD wird diese Lagerform seit 1965 erprobt (Bild 123). Man untersucht die Möglichkeit, schwach- und mittelaktive Abfälle auch ohne Behälter in Salzkavernen unterzubringen. Die verfestigten hochaktiven Abfälle sollen in begehbaren Stollen zur Endlagerung gelangen.

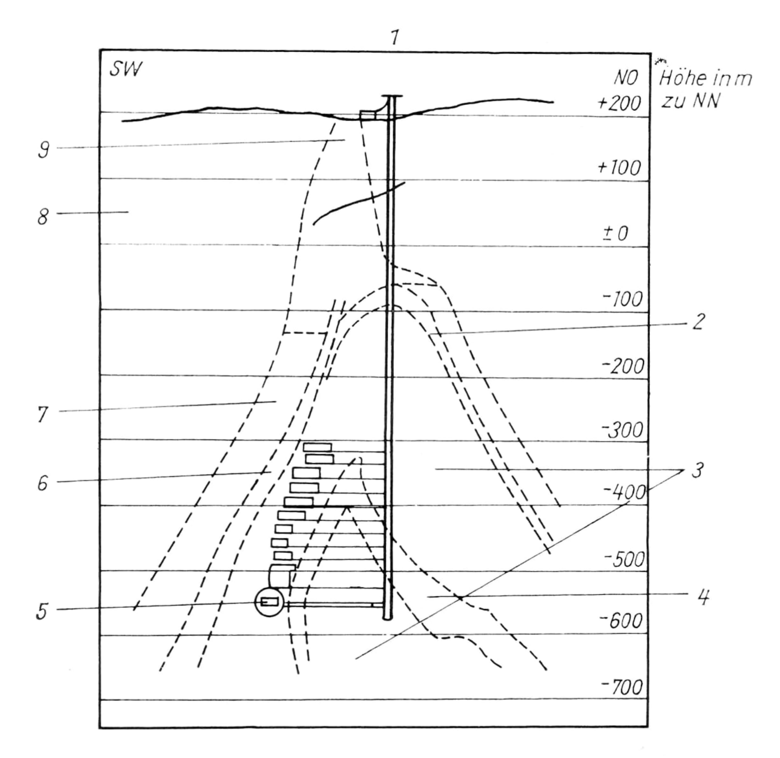
Nutzung der Spaltprodukte

Es fehlt seit Jahren nicht an Vorschlägen und Versuchen zur Trennung des Spaltproduktgemisches. Man verfolgt damit das Ziel, durch Abspaltung der langlebigen Isotope Strontium 90 und Zäsium 137 die Lagerung zu vereinfachen. Die genannten Stoffe könnten in der Strahlenchemie, in Isotopenbatterien oder als Wärmequellen verwendet werden. Die Spaltproduktgewinnung aus Prozeßabfällen wird, bedingt durch die komplizierten Arbeitsverhältnisse infolge der starken radioaktiven Strahlung, aber erst bei großen Mengen rentabel. Ein zunehmender Bedarf wird jedoch erwartet.

Trotzdem die Fragen der Behandlung und Lagerung von radioaktiven Abfällen eine Bearbeitungsstufe erreicht haben, die eine sichere Lösung des Problems erkennen läßt, bedarf es auf diesem Gebiet noch umfangreicher weiterer Forschungen.

122 Einlagerung radioaktiver Abfälle unter Tage in einem ehemaligen Salzbergwerk


600



123 Schnitt durch ein Salzbergwerk mit Einlagerungskammer für radioaktive Abfälle 1 Schacht; 2 Ton; 3 Steinsalz; 4 Kalisalz; 5 Einlagerungskammer; 6 Deckschichten; 7 Buntsandstein; 8 Muschelkalk; 9 Buntsandsteinscholle, verstürzt

Das Risiko der radioaktiven Strahlung

Ausmaß der Gefahr

Bis vor wenigen Jahren war die Kerntechnik noch ausschließlich Sache weniger Fachleute. Heute, und in noch stärkerem Maße in der Zukunft, kommen durch den Bau neuer Kernkraftwerke immer größere Teile der Bevölkerung vieler Länder mit dieser neuen Technik in Berührung. Vorbelastet durch das Wissen um die schrecklichen Auswirkungen von Kernwaffenexplosionen wird deshalb vor dem Bau kerntechnischer Anlagen in großtechnischem Maßstab mit Recht die Frage aufgeworfen, welche Gefahr dadurch für die Menschheit und ihre Umwelt heraufbeschworen wird und mit welchen Mitteln man beabsichtigt, diese Gefährdung abzuwenden oder wenigstens auf ein Mindestmaß zu beschränken. Um die Größe der Gefahr einschätzen zu können, benötigen wir aber zunächst Anhaltspunkte darüber, welche radioaktive Belastung unsere Gesundheit beeinträchtigen kann.

Natürliche Belastung

Seit Millionen von Jahren entwickelt sich das Leben auf der Erde unter dem Einfluß von Strahlung. Im Wechsel von Tag und Nacht sind wir dem von der Sonne ausgehenden sichtbaren und ultravioletten Licht ausgesetzt. Energiereiche Strahlung wirkt ständig aus dem Kosmos und aus der Erdkruste auf uns ein und ist so zu einem natürlichen und gewohnten Faktor unserer Umwelt geworden. Aus dem Ausmaß der natürlichen Belastung können wir deshalb das Risiko einer zusätzlichen künstlichen Bestrahlung beurteilen.

Kosmische Strahlung

Die kosmische Strahlung besteht vorwiegend aus freigesetzten Protonen, die mit großer Energie auf die Lufthülle der Erde treffen und hier Kernreaktionen verschiedener Art auslösen. Als Folge davon erreicht die Erdoberfläche ein

Gemisch verschiedener Strahlungsarten, die uns ohne die entsprechenden Hilfsmittel in keiner Weise bewußt werden. Der energiereiche Anteil, auch harte Komponente genannt, besteht größtenteils aus Mesonen, die in der Lage sind, Betonwände von einigen Metern Dicke zu durchdringen. Elektronen, Positronen und Gammastrahlen bilden die energieärmere oder weiche Komponente, die auf dem Wege durch die Lufthülle wesentlich stärker abgeschwächt wird. Daher ist die Belastung durch die kosmische Strahlung sehr von der Höhenlage abhängig. Auf dem Niveau des Meeresspiegels liegt die mittlere Jahresdosis des Menschen bei ungefähr 0,3 mGy (30 mrem), 3000 m höher sind es 1,0 bis 1,2 mGy (100 bis 120 mrem).

Erdstrahlung

Die Erdstrahlung geht von den in der Erdkruste vorhandenen natürlichen radioaktiven Quellen aus. Ihre Intensität wechselt von Ort zu Ort stark mit den geologischen und mineralogischen Verhältnissen. In Zentraleuropa beträgt die mittlere Jahresdosis etwa 0,55 mGy, gegenüber 3,0 mGy für umfangreiche Granitbezirke in Frankreich und teilweise noch wesentlich höheren Werten für Monazitsandstein, wie er in Indien und Brasilien vorkommt.

Innere Bestrahlung

Verschiedene natürliche Radionuklide gelangen teils in fester Form mit der Nahrung in den menschlichen Organismus, teils werden sie gasförmig aufgenommen und sind daher die Ursache für die innere Strahlenbelastung des Menschen. Kalium und Kohlenstoff werden im Körper ziemlich gleichmäßig verteilt, so kommt es bei Vorhandensein von Radioisotopen dieser Elemente zu einer Ganzkörperbestrahlung, die bei Kalium 40 etwa 0,2 mGy und bei Kohlenstoff 14 etwa 1,5 μGy im Jahr ausmacht. In der Knochensubstanz und im Knochenmark lagern sich vorwiegend Radium 226 und seine Folgeprodukte Blei 210 (Radium D) und Polonium 210 (Radium F) ab und führen zu einer partiellen jährlichen Belastung von etwa 0,4 mGy.

Bei einer Inhalation von gasförmigen Isotopen, insbesondere von Radon und seinen Folgeprodukten, sind vornehmlich die Luftwege betroffen. Je nach Größe setzen sich die Teilchen in verschiedenen Bereichen des Atemtraktes ab. Am stärksten sind die mittleren Bronchien (0,8 bis 2,0 mGy je Jahr) und die Lungenbläschen (0,4 bis 1,0 mGy je Jahr) belastet.

Fassen wir alle Einflüsse zusammen, so sind wir Menschen insgesamt an eine natürliche Ganzkörperbelastung von 1,1 mGy im Jahr gewöhnt (in Meereshöhe). Diesen Wert wollen wir nun mit den Strahlenbelastungen vergleichen, die durch die Entwicklung von Wissenschaft und Technik zusätzlich hinzukommen könnten.

Röntgendiagnostik

Die Nützlichkeit und die Erfolge der röntgenologischen Reihenuntersuchungen sind nicht mehr umstritten. Aller 2 Jahre lassen wir uns röntgen, d. h. zusätzlich bestrahlen, um größerem Unheil vorzubeugen. Das tun wir in der Erkenntnis, daß der damit erzielte Nutzen die geringe, für uns unschädliche Strahlenbelastung von etwa 0,5 mGy/Jahr für die Röntgendiagnostik rechtfertigt.

Den wenigsten unter uns ist wohl bewußt, daß wir täglich weiteren Strahlungsquellen ausgesetzt sind. Die Bestrahlung durch radioaktive Leuchtfarben, das Fernsehen und sonstige Kleinstquellen ist jedoch auch recht gering und wurde im Mittel auf einen Wert unter 0,02 mGy/Jahr abgeschätzt. Sogar die Baustoffe unserer Häuser sind radioaktiv. Sie enthalten Kalium 40, Radium- oder Thoriumverbindungen, die je nach Lagerstätte der Ausgangsstoffe starke Unterschiede in der Strahlung aufweisen. Die mittlere Belastung aus dieser Quelle liegt in der gleichen Größenordnung wie die Werte der Röntgendiagnostik.

Auswirkung der Kerntechnik

Die Belastung der Bevölkerung durch den Betrieb kerntechnischer Anlagen liegt zur Zeit unter 0,01 mGy/Jahr und ist deshalb, verglichen allein mit der natürlichen Belastung von 1,10 mGy/Jahr, praktisch zu vernachlässigen. Die strenge Auslegung und Einhaltung der bestehenden Vorschriften und die Weiterentwicklung der technischen Schutzeinrichtungen sollen gewährleisten, daß die Größenordnung dieser Werte auch in Zukunft eingehalten werden kann.

Da wir die Wirkung der radioaktiven Strahlung auf unseren Körper nicht fühlen können, stellt sie für uns etwas sehr Ungewohntes und Unheimliches dar. Auch Menschen, die bei der Explosion von Kernspaltungsbomben die mehrfache tödliche Dosis (Letaldosis) erhalten hatten, spürten im Augenblick der Bestrahlung gar nichts. Erst nach Stunden stellten sich die ersten Beschwerden, wie Erbrechen, Durchfall, Fieber, ein. Der Tod erfolgte in den schlimmsten Fällen nach Tagen, oft aber auch nach Monaten oder sogar Jahren schrecklichen Siechtums.

Biologische Wirkung radioaktiver Strahlung

Ionisierung

Die Ionisierung der bestrahlten Materie ist neben der energetischen Anregung der Atome oder Moleküle der physikalische Primärvorgang, auf dem auch die biologischen Wirkungen der radioaktiven Strahlen beruhen. Diese Wirkungen hängen von zahlreichen physikalischen und biologischen Gegebenheiten ab. Das sind einerseits die Intensität, die Art und die Durchdringungsfähigkeit der Strahlung, zum anderen die Größe des durchstrahlten Körpervolumens und die räumliche Verteilung der Strahlung im Körper, da die betroffenen Organe unterschiedlich reagieren.

Genetischer Effekt

Als besonders empfindlich werden die Keimdrüsen, die blutbildenden Organe und die Augenlinsen angesehen. Es muß angenommen werden, daß der genetische Effekt, d. h. die sich ungünstig auswirkende Erhöhung der Mutationsrate der Gene, linear von der Keimdrüsendosis abhängt und keine Schwellendosis existiert. Dieser Umstand wurde den Festlegungen von zulässigen Werten für die Bestrahlung des ganzen Körpers zu Grunde gelegt. Bei einer Belastung einzelner Organe oder von Teilen des Körpers, mit Ausnahme der kritischen, ist eine höhere Dosis erlaubt.

Allgemein kann man sagen, daß jede zusätzliche Strahlenbelastung biologisch wirksam ist und zumindest vom genetischen Gesichtspunkt aus negative Auswirkungen hat. So gesehen soll, auch unterhalb der festgelegten Grenzwerte, jeder Umgang mit energiereichen Strahlen auf das absolut Notwendige beschränkt bleiben.

Risiko der Kernkraftwerke

Nachdem wir nun wissen, an welche radioaktive Belastung wir schon seit Millionen von Jahren gewöhnt sind und welche Schäden höhere Bestrahlungsdosen bewirken, wollen wir das unvermeidliche Restrisiko der Kernkraftwerke mit anderen Risiken unseres Lebens vergleichen.

Der vorliegenden Betrachtung liegt eine zusätzliche Dosisbelastung durch Kernkraftwerke von 0,01 mGy im Jahr zugrunde, die unter Umständen bei Einzelpersonen in der näheren Umgebung der Kraftwerke erreicht werden kann. Außerdem wurde der ungünstigste Fall hinsichtlich der Wirkung der Bestrahlung angenommen, daß nämlich zwischen beiden eine lineare Abhängigkeit und kein Schwellenwert besteht.

Folgende Risiken ergeben sich daraus für den Eintritt eines Schadens durch verschiedene Krankheiten:

Krankheitsrisiken

	Natürliches Risiko je Jahr	Zusätzliches Risiko bei 0,01 mGy je Jahr
Leukämie	$50 \cdot 10^{-6}$	$0{,}02 \cdot 10^{-6}$
Krebs	$3000 \cdot 10^{-6}$	$0{,}10 \cdot 10^{-6}$
Mißbildungen (20000 Geburten je Jahr und je Million Einwohner)	$200 \cdot 10^{-6}$	$0{,}06 \cdot 10^{-6}$

Krankheiten dieser Art sind leider nicht die einzige Bedrohung unseres Lebens. Andere Risiken zeigt die Übersicht auf Seite 215.

Risiken des täglichen Lebens

	Todesfälle je Jahr und je 1 Million Personen
Natürliche Krankheiten	10000
Unfälle aller Art	500
Verkehrsunfälle	250
Verwendung elektrischer Energie	20
Kohle- und Ölkraftwerke	3
Naturkatastrophen	1
Kernkraftwerke (0,01 mGy je Jahr)	$<0{,}2$

Die kommerziellen Kernkraftwerke der Mitgliedsländer der Internationalen Atomenergie-Organisation haben bis Ende 1975 insgesamt mehr als 1000 Reaktorjahre gearbeitet, wobei einige Anlagen bereits seit 20 Jahren in Betrieb standen. In der gesamten Zeit wurde kein tödlicher Unfall infolge Versagens nuklearer Anlagenteile oder durch Radioaktivität in einer dieser Anlagen registriert. Das bestätigt die Richtigkeit der vorstehenden Risikobetrachtungen und die Sicherheit der Kernkraftwerke.

Inbetriebnahme kerntechnischer Anlagen

In der DDR ist das Staatliche Amt für Atomsicherheit und Strahlenschutz (SAAS) zuständig für die vielfältigen Sicherheitsfragen und Strahlenschutzprobleme, die sich bei der Nutzung der Kernenergie für friedliche Zwecke ergeben. Dieses Amt ist gleichermaßen verantwortlich für die Vorbereitung der Rechtsetzung und die Genehmigungsverfahren auf dem Gebiet der Kerntechnik, die strahlenschutzmedizinische Überwachung einschließlich der Arbeitsplatzkontrolle, die nukleare Anlagensicherheit, die Kernmaterialkontrolle sowie die Behandlung und Beseitigung radioaktiver Abfälle, den nuklearen Umweltschutz und die Ausbildung von Strahlenschutzfachkräften. Dieses umfassende Gebiet setzt natürlich theoretische und experimentelle Arbeiten in dieser Richtung voraus, welche die wissenschaftliche Begründung aller Entscheidungen sichern müssen.

Genehmigungen

Die Inbetriebnahme von kerntechnischen Anlagen, zu denen im Sinne der entsprechenden Genehmigungsanordnungen auch die Kernkraftwerke gehören, bedarf der Zustimmung durch das SAAS. Die Zustimmung erhält man nur dann, wenn eine festgelegte Reihe von Unterlagen erarbeitet worden ist. Am Beispiel eines Kernkraftwerkes soll hier gezeigt werden, welche umfangreichen Vorarbeiten gefordert werden, um das erklärte Ziel, den Schutz des Menschen und seiner Umwelt vor der schädigenden Einwirkung ionisierender Strahlung, zu erreichen.

Spezielle Arbeitsordnung

Für jedes Kernkraftwerk ist eine auf dem neusten Stand zu haltende spezielle Arbeitsordnung aufzustellen. Darin muß festgelegt sein, welche Mitarbeiter in den einzelnen Bereichen für den Strahlenschutz verantwortlich sind, in welchen Räumen mit offenen oder nur mit in Behältnissen eingeschlossenen radioaktiven Stroffen gearbeitet werden darf und welche Kontrollen, einschließlich der medizinischen Überwachung vorgesehen sind.

In sogenannten Havarie- und Alarmplänen werden alle Maßnahmen zusammengestellt, die zur Einschränkung der Auswirkungen eines Reaktorunfalles auf die Mitarbeiter, das Kraftwerk und die Umgebung eingeleitet werden. Das setzt voraus, daß man in Modellhavariefällen untersucht, welche Mengen der verschiedenen radioaktiven Stoffe freigesetzt werden könnten und welche Meß-

signale zuverlässige Kriterien für die Auslösung eines Alarms darstellen. Die für diesen Fall nötigen Schutzausrüstungen müssen bereitstehen und die Hilfeleistungen anderer Dienststellen bekannt sein.

Ein Meßprogramm wird vorbereitet, mit dem nachzuweisen ist, daß die im Projekt enthaltenen Grenzwerte für die ionisierende Strahlung während des Betriebes des Kernkraftwerkes eingehalten werden. Insbesondere sind Stellen mit besonderer Strahlengefährdung zu ermitteln. Dabei ist zu berücksichtigen, daß einige radioaktive Stoffe durch Akkumulation während des stabilen Leistungsbetriebes erst nach 2 bis 3 Jahren eine Gefahr darstellen.

Umgebungsüberwachung

Sehr wichtig ist das Programm der Umgebungsüberwachung im Normalbetrieb des Kernkraftwerkes und bei Störfällen. Das Programm soll enthalten:

- Charakterisierung der Umgebung (z. B. meteorologischer Ausbreitungsbedingungen, Besiedlung und Nutzung der Umgebung),
- Überwachung der Abluft und des Abwassers auf Radioaktivität (z. B. Orte der ständigen und möglichen Aktivitätsabgabe, Festlegung der Interventionsschwellen, Maßnahmen beim Überschreiten der zulässigen Werte),
- Kontrolle der Umgebungsmedien (z. B. ständige Meßstellen, Meßstellen beim Überschreiten der Interventionsschwellen, Aerosolmessung der Luft, Fallout- und Niederschlagsmessungen, Messung von Biomedien für die Hauptbelastungskette und im Oberflächenwasser).

Wiederholungsprüfungen

Wiederholungsprüfungen sind auch für kerntechnische Anlagen ein außerordentlich wirksames Mittel zur Erhöhung der Sicherheit und müssen deshalb rechtzeitig im voraus geplant werden. Die Zuverlässigkeit einzelner Anlagenteile wird dadurch zwar nicht beeinflußt, jedoch bewahrt das rechtzeitige Aufdecken kleinerer Fehler und ihre Reparatur die gesamte Anlage vor größeren Folgeschäden. Zerstörungsfreie Prüfmethoden vielfältiger Art werden dazu eingesetzt.

Die Verfahren der betriebsgerechten Prüfungen und Überwachungen, zu denen außer den Wiederholungsprüfungen z. B. auch die Methoden der Rauschdiagnostik zählen, ermöglichen es, daß die Lebensdauer der kontrollierten Anlagen weitestgehend ausgenutzt werden kann. Durch ein ausgewogenes Programm dieser Prüfungen, das auch für die Genehmigung verlangt wird, kann nach Angaben in der Literatur die Ausfallwahrscheinlichkeit von Teilanlagen der Kraftwerke um 1 bis 2 Zehnerpotenzen gesenkt werden.

Senkung der Ausfälle

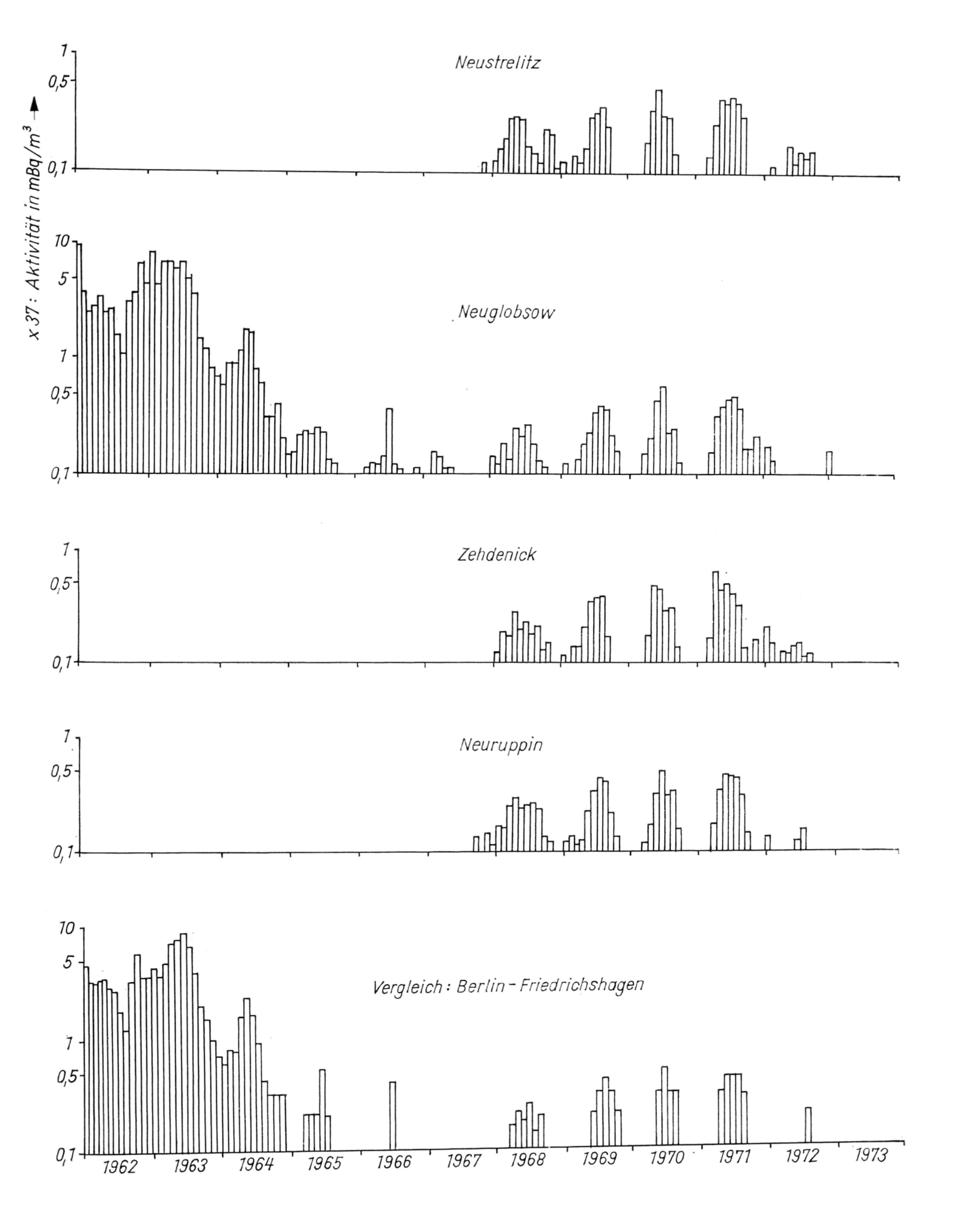
Reaktordruckgefäße, Rohrleitungen und andere Komponenten des ersten Kühlkreislaufs von Druckwasserreaktoren können jedoch nach einiger Betriebszeit wegen der eigenen starken Gammaaktivität nicht mehr mit der sonst üblichen Röntgenstrahlung untersucht werden. Hier müssen andere Methoden, z. B. Ultraschallverfahren, eingesetzt werden.

Die Erfordernisse und die Häufigkeit der Wiederholungsprüfungen sind in starkem Maße bei der Konstruktion und Anordnung der Anlagenteile zu berücksichtigen. Ebenso ist zu bedenken, daß die notwendigen Reparaturen unter einem Minimum an Strahlenbelastung durchgeführt werden können. Diese Arbeiten werden üblicherweise in Betriebspausen für die Umladung des Kernbrennstoffs ausgeführt, so daß keine zusätzlichen Stillstandszeiten entstehen.

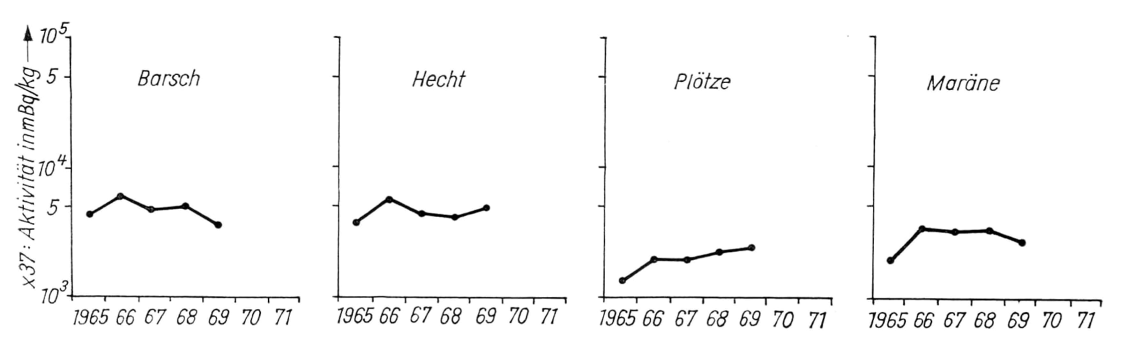
Startprogramme

Für die Inbetriebnahme von Kernreaktoren sind das Beladeprogramm der Spaltzone mit Kernbrennstoff und das Programm des Experiments, bei dem der Kernreaktor zum ersten Mal den kritischen Zustand erreicht, vorzulegen. In beiden ist mit ausreichender Sicherheit nachzuweisen, daß in keinem Fall das System außer Kontrolle geraten kann. Dabei müssen alle möglichen Fehlerquellen berücksichtigt werden.

Im Rahmen des Vertrages über die Nichtweiterverbreitung von Kernwaffen sind Unterlagen über den vorhandenen Kernbrennstoff und seine Lagerung für die Sicherheitskontrollen und Inspektionen durch Kommissare der Internationalen Atomenergie-Organisation, die ihren Sitz in Wien hat, bereitzustellen.



124 Brutto-Beta-Aktivität der Aerosole in der bodennahen Luft der Umgebung des Kernkraftwerkes Rheinsberg (DDR)



125 Zäsium-137-Konzentration in Nutzfischen aus dem Stechlinsee bei Rheinsberg (DDR)

Um eine Beeinträchtigung der Umgebung eines Kernkraftwerkes durch den Betrieb von Kernreaktoren festzustellen oder ausschließen zu können, muß mindestens ein Jahr vor Beginn des Probebetriebs des Reaktors mit der Registrierung der Radioaktivität an allen den Punkten begonnen werden, die auch später überwacht werden sollen. Auf diese Weise erfaßt man auch gleichzeitig die jahreszeitlichen Schwankungen der Meßwerte. Als Beispiel für derartige Untersuchungen wollen wir die Ergebnisse und Erfahrungen der Umgebungsüberwachung am KKW Rheinsberg in der Mark betrachten, das 1966 seinen Betrieb aufnahm.

Beispiel Rheinsberg

Die Brutto-Beta-Aktivität der Aerosole in der bodennahen Luft wurde in vier in der Nähe gelegenen Stationen des Meteorologischen Dienstes gemessen. Die unmittelbar benachbarte Station Neuglobsow liegt gerade dort, wo nach den mittleren meteorologischen Verhältnissen das Belastungsmaximum zu erwarten ist. Die etwas weiter (15 bis 30 km) entfernten Stationen Neuruppin, Neustrelitz und Zehdenick liegen in Städten, die eine für die Standortverhältnisse hohe Bevölkerungsdichte aufweisen. Das Bild 124 zeigt die aus den gemessenen Tagesmittelwerten errechneten Monatsmittelwerte der Brutto-Beta-Aktivität der Aerosole für den Zeitraum 1962 bis 1973 und zum Vergleich die in der Station Berlin-Friedrichshagen im gleichen Zeitraum ermittelten Monatswerte.
Da sich die Werte aller Stationen nur unwesentlich voneinander unterscheiden, kann man daraus schließen, daß die Meßergebnisse hauptsächlich den durch die damaligen Kernwaffentests verursachten radioaktiven Gehalt der bodennahen Atmosphäre widerspiegeln. Nachdem man die radioaktiven Auswürfe des Kraftwerkes und die meteorologischen Bedingungen gemessen hatte, konnte man die Belastungen der bodennahen Atmosphäre durch den Betrieb des Kernreaktors abschätzen und erhielt Werte, die 4 bis 5 Größenordnungen unter denen liegen, die aus der Zeit der Kernwaffenversuche stammen.

Messungen im Stechlinsee

Der 3. Kühlkreislauf des KKW Rheinsberg führt Wasser aus dem Nehmitzsee über den Kondensator in den Stechlinsee. Aufgrund der Vorgabe, daß dabei keinerlei radioaktive Verunreinigungen mit in den See gelangen dürfen, wird laufend der radioaktive Gehalt des Wassers kontrolliert. Von 1965 bis 1970 bestimmte man auch den Zäsium-137-Gehalt der wichtigsten Nutzfischarten (Hecht, Barsch, Plötze, Maräne), insbesondere in ihren eßbaren Teilen. Die Brutto-Beta-Aktivität des Stechlinsees ändert sich bisher nur sehr wenig und auch die Werte für den Zäsium-137-Gehalt der Fische liegen bei denen, die in Schweden, Finnland und der BRD in Gewässern mit annähernd gleichem Kaliumgehalt gefunden wurden (Bild 125). Anhand dieser Ergebnisse kann ausgeschlossen werden, daß radioaktiv verunreinigtes Abwasser in den See gelangt ist.

Insgesamt kann mit Hilfe aller Messungen und Abschätzungen bewiesen werden, daß die durch den normalen Betrieb des Kernreaktors bewirkten Strahlenbelastungen der Personen in der Umgebung praktisch vernachlässigbar sind. Sie ist tatsächlich viel geringer als die Schwankungen der natürlichen Untergrundstrahlung in Häusern, die aus verschiedenen Arten von Steinen gebaut sind.

Internationale Zusammenarbeit

Neuere Untersuchungen zeigen, daß etwaige radioaktive Auswürfe aus einer Emissionsquelle, insbesondere durch langlebige Nuklide, auch in weit entfernt liegenden Gebieten wesentliche Beiträge zur Gesamtbelastung der Bevölkerung liefern können. In kleineren Ländern kann die Belastung deshalb im wesentlichen durch Quellen außerhalb der Landesgrenzen verursacht werden. Die Festlegung von Grenzwerten sollte daher im internationalen Rahmen bald in Angriff genommen werden, wenn auch in absehbarer Zeit keine unmittelbare Gefahr besteht.

Sicherheitstechnik an Kernkraftwerken

Schutzsysteme

Nach den vorstehenden Erörterungen ist es einleuchtend, daß in Kernkraftwerken eine Sicherheitstechnik vorhanden sein muß, die alle Betriebszustände verhindert, bei denen die für unsere Gesundheit gefährlichen radioaktiven Stoffe freigesetzt werden können. Die Anforderungen wurden im Bewußtsein dieser Gefahr rechtzeitig vor Beginn der friedlichen Nutzung der Kernenergie so hoch gestellt, daß das reale Risiko der Kerntechnik um Größenordnungen geringer ist als andere technischen Risiken.

Mehrfache Auslegung

Radioaktive Stoffe entstehen im Reaktor vorwiegend als Folgeprodukte der Kernspaltung im Brennstoff. Sie existieren gasförmig (Xenon, Krypton), flüchtig (Jod 131) und fest (Zäsium 137, Strontium 90). Um das Entweichen der Spaltprodukte sicher zu verhindern, ist ein mehrfach ausgelegtes Schutzsystem erforderlich. Das erste und auch wesentlichste Hindernis ist die dicht geschlossene Schutzhülle des Brennstoffs aus Stahl, aus Zirkoniumlegierungen oder aus pyrolytischem Graphit. Obwohl die Spaltprodukte teilweise auch im Kristallgitter des Kernbrennstoffs zurückgehalten werden, wird verlangt, daß diese Hülle für die Spaltprodukte absolut undurchlässig ist.

Überwachung des ersten Kreislaufs

Es ist natürlich aus physikalischen und auch aus ökonomischen Gründen nicht möglich, die erste Barriere so stark auszulegen, daß keinerlei mechanische Kräfte ein Leck verursachen könnten. Deshalb unterliegt der erste Kühlkreislauf besonderen Sicherheitsanforderungen hinsichtlich der mechanischen Festigkeit und der ständigen Überwachung seiner Aktivität infolge von denkbaren Verunreinigungen durch Spaltprodukte. Die gesamte Spaltzone ist von einem äußerst stabilen Druckbehälter umschlossen, der allen auftretenden Belastungen hinsichtlich Druck, Temperatur und Strahlung standhält. Um den Reaktordruckbehälter und den ersten Kühlkreislauf wird eine sogenannte Abschirmung aufgebaut, welche die Umgebung vor direkter Strahlung schützt. Doch damit gibt man sich nicht zufrieden.

Containment

Eine weitere Hülle umgibt den gesamten nuklearen Teil der Kraftwerksanlagen. Sie muß so ausgelegt sein, daß auch bei der schwersten technischen Störung, das ist der Bruch einer Hauptleitung im Primärkreislauf, die gesamte dabei auftretende Dampf- oder Gasmenge in diesem Raum eingeschlossen bleibt.

Eine weitere Quelle von unerwünschten radioaktiven Stoffen sind die sogenannten Aktivierungsprodukte. Durch die jede Kettenreaktion der Kernspaltung begleitenden Neutronen werden im Kühlmittel, aus Verunreinigungen des Kühlmittels, aus Korrosionsprodukten und in der näheren Umgebung der Spaltzone durch Kernreaktionen radioaktive Isotope gebildet. Hauptsächlich sind dies Tritium, Argon 41 und Stickstoff 16. Umfangreiche, sorgfältig überwachte

Reinigungsanlagen und mit großer Sicherheit arbeitende Reinigungssysteme entfernen durch Verdampfung, Ionenaustausch, Fällung, Ausfrieren und Filtration die Verunreinigung aus dem in geschlossenem Kreislauf arbeitenden Kühlsystemen.

Für die Reinigung der Abluft sorgen ähnliche Systeme mit komplizierten Filteranlagen. Es ist bisher technisch unvermeidlich, daß ein geringer Anteil der radioaktiven Stoffe über die Abluft und das Abwasser in die Umgebung gelangt. Nach den bisherigen Erfahrungen liegt dieser Teil jedoch weit unter den gesetzlich erlaubten Mengen und macht nur einen unwesentlichen Bruchteil der natürlichen Strahlenbelastung aus.

Schutz gegen äußere Gewalt

Je nach Lage des Kernkraftwerkes werden die Schutzmaßnahmen gegen äußere Einwirkungen vorgesehen. So werden z. B. nicht nur in Japan die Anlagen erdbebensicher gebaut. Das gleiche ist auch in den südlichen Sowjetrepubliken vorgesehen, z. B. beim armenischen Kernkraftwerk im Gebiet Mezamor. Auf jeden Fall müssen die Reaktorgebäude selbstverständlich vor mutwilligen Beschädigungen sicher sein. Auch durch den Absturz einer schnellfliegenden Düsenmaschine darf die Reaktoranlage nicht so zerstört werden, daß dieses Ereignis einen nuklearen Unfall nach sich ziehen kann. Insbesondere wirken sich alle diese Forderungen auf die Gestaltung des äußeren Schutzbehälters aus.

Vorbeugen ist besser als heilen

Sämtliche für die Sicherheitstechnik notwendigen Komponenten des Kernkraftwerkes unterliegen schon bei der Herstellung einer äußerst gründlichen Prüfung, bei der sehr hohe Maßstäbe angelegt werden. Während des Betriebes gewährleistet eine ständige Überwachung der wichtigsten Teile, daß Fehler schnell erkannt und die entsprechenden Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Allein für die Qualitätskontrolle werden heute etwa 25% der gesamten Investitionskosten eines Kernkraftwerkes ausgegeben. Auch daran kann man ersehen, welch großer Wert der Sicherheit in der Kerntechnik beigemessen wird. In vorgeschriebenen zeitlichen Abständen finden Wiederholungsprüfungen statt, um während des Betriebes aufgetretene Veränderungen zum frühestmöglichen Zeitpunkt aufzudecken.

Störfallanalyse

Es ist ein Vorteil der Kerntechnik, daß man von Anfang an ihre wesentlichsten Gefahrenquellen kannte. Die Fachleute wußten, mit welchen Störfällen gerechnet werden muß, welche Folgen sie haben könnten und ungefähr auch, mit welcher Wahrscheinlichkeit sie auftreten. Mit großer Wahrscheinlichkeit sind verschiedene kleinere Störungen zu erwarten, die jedoch keine oder kaum eine Beeinträchtigung der Sicherheit darstellen. Eine außerordentlich geringe Wahrscheinlichkeit gibt es für Störfälle, bei denen große Mengen von Spaltprodukten freigesetzt werden und eine Schädigung des Betriebspersonals und der Umwelt eintreten könnte. Damit dieser Fall aber trotz seiner äußerst geringen Wahrscheinlichkeit nicht Wirklichkeit werden kann, sorgen zusätzliche Sicherheitseinrichtungen dafür, daß solche Störungen schlimmstenfalls zur Stillegung der Anlage führen und das Betriebspersonal sowie die Umgebung keinesfalls beeinträchtigt werden.

Notkühlung

Ein Beispiel soll die Funktion der Zusatzeinrichtungen illustrieren. Wird der Reaktor aus irgend einem Grunde plötzlich abgeschaltet, muß die durch die Strahlung der Spaltprodukte entstehende Nachwärme ohne Verzögerung aus der Spaltzone abgeführt werden. Diese Nachwärme kann unmittelbar nach dem Abschalten bis zu 5% der Ausgangsleistung betragen, das wären bei einem Kraftwerk mit 1000 MW(el) und einer thermischen Leistung von etwa 3000 MW immerhin 150 MW. Ohne Zusatzkühlung würden die Brennelemente schmelzen und erhebliche Mengen an Spaltprodukten freigesetzt werden. Weil man die denkbar ungünstigste Situation vor Augen hat, wird die Notkühlung vierfach ausgelegt und das Wasser Vorratsbehältern entnommen.

Größter anzunehmender Unfall

Der größte anzunehmende Unfall bei einem Druckwasserreaktor ist der Bruch einer Leitung im ersten Kühlkreislauf. Augenblicklich würden Dampf und Wasser aus der Bruchstelle austreten und den Reaktor vom Druck entlasten. Sofort müßte die Notkühlung in Aktion treten und durch die Art ihrer Auslegung

auf jeden Fall gewährleisten, daß die Brennelemente gekühlt werden. Der äußere Sicherheitsbehälter würde die austretenden Mengen an Dampf und Wasser auffangen. Tatsächlich sind an einem Reaktor solche Unfälle nur einmal in 10000 bis 100000 Jahren zu erwarten.
Es ist kein Widerspruch, wenn trotz der recht großen Sicherheit der Kernkraftwerke noch weiterhin an diesen Problemen gearbeitet wird. In der Technik gibt es keine absolute, sondern nur eine relative Sicherheit und deshalb immer Möglichkeiten zur Verbesserung. Außerdem werfen die Entwicklung der Kernenergie zu größeren und damit wirtschaftlicheren Einheiten, die Wahl von Reaktorstandorten in der Nähe größerer Wohnsiedlungen und die Einführung neuartiger Reaktortypen (Hochtemperaturreaktor, schneller Brüter) neue Fragen der nuklearen Sicherheitstechnik auf, die beantwortet werden müssen.

Hohe Sicherheit des HTR

Eine besonders auch hinsichtlich der Sicherheit vielversprechende Konzeption ist die des Hochtemperaturreaktors (HTR), an der in einigen Ländern schon intensiv gearbeitet wird (Aufbau und Funktionsweise s. S. 186). Untersuchungen zeigen, daß nach einer Schnellabschaltung eines derartigen Reaktors bei unbeschädigtem Primärkreislauf und vollem Kühlgasdruck allein schon durch Naturkonvektion des Kühlmittels Helium die gesamte Nachwärme z. B. an die Dampferzeuger abgeführt werden kann.
Als größter einzukalkulierender Unfall bei einem HTR wird der Kühlgasverlust nach einem Bruch im Primärkreislauf und der Ausfall der Kühlmittelumwälzung angesehen. Das Kühlgas würde in der Spaltzone stagnieren, und die gesamte Nachwärme müßte von den Reaktoreinbauten aufgenommen werden. Doch auch in diesem ungünstigsten Fall sind die kugelförmigen Brennelemente mit Graphithülle nicht unmittelbar gefährdet. Durch die ungleichmäßige Leistungsverteilung in der Spaltzone werden nur etwa 10% der Kugeln auf Temperaturen etwas über 2000 °C aufgeheizt. Der Sublimationspunkt von Graphit liegt aber erst bei 3650 °C. Dadurch wird der Brennstoff sicher an seinem Platz im Graphit gehalten. Es bleibt noch verhältnismäßig viel Zeit, um gezielte Maßnahmen zur Begrenzung schwerwiegender Auswirkungen zu ergreifen, denn erst nach Stunden tritt ohne Kühlung eine gewisse Spaltproduktfreigabe auf. Das ist sehr günstig, denn beispielsweise beim Siedewasserreaktor müssen schon in etwa zehn Sekunden nach Kühlmittelverlust Vorkehrungen wirksam werden, die ein Schmelzen der Spaltzone verhindern.

Graphit speichert Wärme

Die Ursache für die vorteilhafte Situation beim HTR ist in der hohen Wärmekapazität der Graphiteinbauten sowie in der relativ geringen mittleren Leistungsdichte von etwa 5 MW/m^3 zu suchen. Demgegenüber gibt es bei Wasserreaktoren Werte bis 100 MW/m^3, bei schnellen Brütern sogar bis 1000 MW/m^3. Ein notwendiger Zusatz wäre unbedingt ein zweites hitzebeständiges neutronenabsorbierendes Abschaltsystem, da die sonst üblichen Stahlrohre nach einigen Stunden schmelzen.
Der Reaktordruckbehälter, als äußerster Schutzmantel des HTR, ist auch unter den ungünstigsten Umständen nicht durch die Wärmebelastung von innen gefährdet. Bei zunehmender Erwärmung wird nur ein Absenken des Innendrucks erforderlich, da unter diesen Umständen die Festigkeit von Beton und Spannstahl nachläßt. Voruntersuchungen für HTR mit einer thermischen Leistung von 3000 MW zeigen, daß bei genügend kleiner mittlerer Leistungsdichte auch bei den schlimmsten Unfällen die Formbeständigkeit der Brennelemente gewährleistet ist.
Alle diese Tatsachen weisen den HTR als den Reaktor mit der bisher größten Sicherheit aus. Deshalb ist eine Berücksichtigung dieses Typs in zukünftigen Reaktorstrategien dringend zu empfehlen.
Bei allen Argumentationen hinsichtlich der Sicherheit kerntechnischer Anlagen muß man jedoch in Betracht ziehen, daß der Kernenergie noch immer der Schatten der kriegerischen Vernichtungsgewalt anhängt, mit dem die Menschheit seit dem Abwurf von Atombomben auf Hiroshima und Nagasaki konfrontiert ist.

14 Kernexplosionen

Spaltmaterial als Sprengstoff

Der Beschluß der USA-Regierung zur Mobilisierung größerer Kräfte für den Bau der Atombombe bewirkte den Einsatz finanzieller, wissenschaftlicher und technischer Mittel, wie ihn die Geschichte zur Verwirklichung derartiger Projekte bisher nicht gekannt hatte. Es bildete sich ein militärisch-industrieller Komplex heraus: Die führenden Monopolgruppen verbündeten sich mit der USA-Armee und übernahmen die wesentlichsten Aufträge. Damit eröffnete sich für sie eine sehr ergiebige Profitquelle. Über diese Vorgänge schreibt der Geschichtswissenschaftler *Stulz*:

Gewinne der USA-Monopole

»Formell verzichteten die Monopole auf Gewinn. Tatsächlich konnten sie in doppelter Hinsicht eine besonders hohe Profitrate einstreichen. Einmal durch die Lieferung der gesamten Ausrüstung für die Bombenherstellung, die im Unterschied zur konventionellen Rüstungsproduktion wegen der Geheimhaltung kaum irgendwelchen Preiskontrollen unterworfen war. Zum anderen durch die Nutzung der unzähligen neuen Erfindungen und technischen Verfahren, die im Zusammenhang mit dem Bau der Bombe durch intensive Forschung entwickelt wurden. Sie kosteten die Monopole nicht einen Dollar, da die gesamten Forschungsausgaben durch staatliche Mittel beglichen oder den Unternehmen zurückerstattet wurden.«

Auf der Basis der fast unbegrenzten Mittel wurden häufig mehrere Verfahren parallel entwickelt und meistens ohne weitere Zwischenschritte in die Großproduktion übernommen. Seit 1942 beteiligte sich auch Großbritannien an den Arbeiten in den USA. Zur Gewinnung des Kernsprengstoffs baute man gleichzeitig, um höchstes Tempo zu sichern, in Oak-Ridge Anlagen zur Anreicherung des Urans 235 mittels physikalischer Trennverfahren (Bild 126) und in Hanford Kernreaktoren zur Erzeugung von Plutonium.

Plutoniumfabriken

Im April 1943 begannen die Erdarbeiten zur Errichtung der Plutoniumfabrik von Hanford im Bundesstaat Washington, auf der Westseite des Columbia River. Vorher gab es in dem von der Regierung erworbenen nahezu 1800 km² großen, aber ziemlich unfruchtbaren Gebiet lediglich zwei kleine Dörfer. Während der Arbeiten im Jahre 1944 hatte die Barackenstadt von Hanford 60000 Einwohner.

Im September 1943 war der erste Reaktor fertig, im September 1944 folgte der zweite und Anfang 1945 der dritte. Es waren graphitmoderierte thermische

Erzeugung von Kernsprengstoff

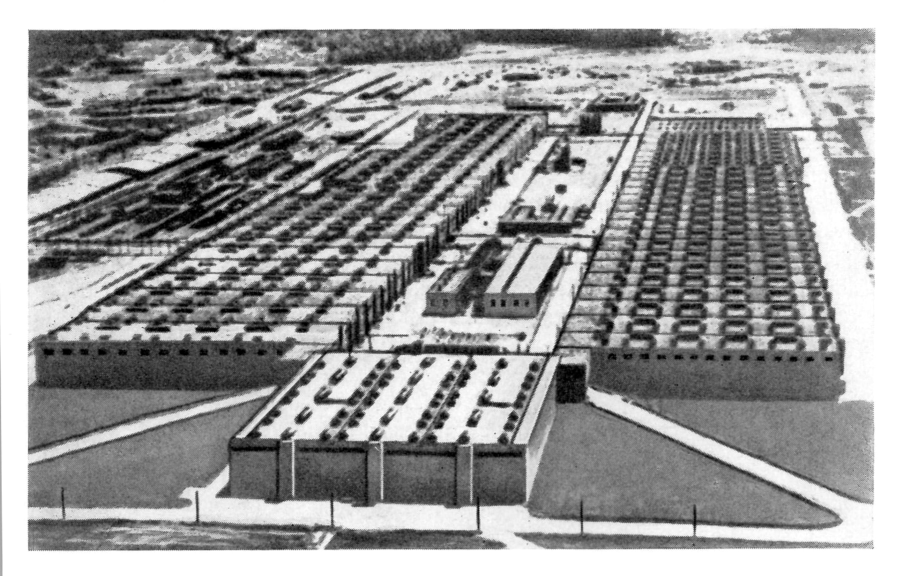
Systeme, die zu der Zeit am weitesten entwickelt waren. In diesen Anlagen wird Plutonium über den Einfang von Neutronen durch Uran 238 erzeugt. Der beim Betrieb von Leistungsreaktoren auftretende Nebeneffekt, daß das Spaltmaterial sich durch Brüten ergänzen läßt, kann auch zur Herstellung von Kernsprengstoff genutzt werden. Dafür ist jedoch nur das sich zuerst bildende Plutonium 239 geeignet. Verbleibt es einige Zeit in der Spaltzone, dann werden durch weiteren Neutroneneinfang höhere Plutoniumisotope erzeugt, die eine Verwendung des Materials für die Kernspaltung ausschließen und sich nicht chemisch abtrennen lassen, da es sich um das gleiche Element handelt.
Kernbrennstoff darf deshalb bei beabsichtigter Verwendung als Material für Bomben nur kurze Zeit im Reaktor verbleiben. Eine kurze Aufenthaltszeit des Brutmaterials in der Spaltzone kann als Anzeichen für den späteren Einsatzzweck gedeutet werden.

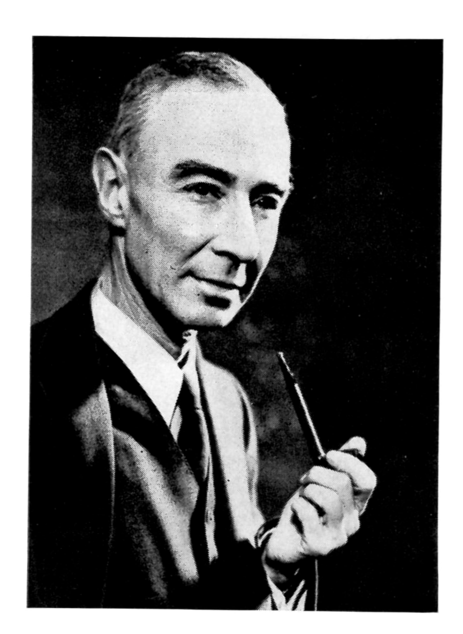
Graphitreaktoren als Brüter

Insgesamt gesehen erwies sich aber der Brutprozeß in den Graphitreaktoren als nicht sehr effektiv. Bei der Spaltung der Atomkerne des Urans 235 entstehen zwar im Mittel je Spaltung durch ein thermisches Neutron 2,46 freie Neutronen. Der Mittelwert je absorbiertem, also verbrauchtem Neutron ist aber kleiner, da nur etwa 80% dieser Neutronen eine Spaltung auslösen und die restlichen nur angelagert werden. Dadurch verringert sich der wirklich zur Verfügung stehende Mittelwert von 2,46 auf nur 2,07 Neutronen. Davon wird für die weitere Aufrechterhaltung der Kettenreaktion 1 Neutron benötigt, so daß nur etwa reichlich 1 Neutron für die unvermeidlichen Verluste durch Einfang im Strukturmaterial des Reaktors und in den Steuerstäben, durch Herausfliegen aus dem System und für den erwünschten Einfang im Uran 238 übrigbleiben. Das ist sehr wenig, und deshalb war die Ausbeute an Plutonium auch recht gering.
Der Physiker *Robert Oppenheimer* (Bild 127), der seit Anfang 1942 ständig an den kernphysikalischen Forschungen mitarbeitete, kam nach wenigen Monaten zu dem Schluß, daß das Atomprojekt nur Erfolg haben könnte, wenn die über das ganze Territorium der USA verteilten Entwicklungsgruppen in einem Laboratorium vereinigt werden. Die Idee wurde von dem militärischen Befehlshaber des Projekts, General Groves, sofort aufgegriffen.
Man fand für das neue Laboratorium in Los Alamos, im Bundesstaat New Mexico



126 Die Anlage K-25 in Oak Ridge (USA) enthält einige tausend Trennstufen zur Trennung der Uranisotope nach dem Gasdiffusionsverfahren





127 *Robert Oppenheimer*

Neues Zentrum in Los Alamos

einen menschenfernen und abgelegenen Platz. Er lag 2194 m hoch auf einem flachen Tafelberg, einer sogenannten »Mesa«, im Jemez-Gebirge. Ende 1942 begannen die Bauarbeiten. Im März des folgenden Jahres trafen die ersten Atomforscher ein, und schon im Juni waren mit den aus allen Universitätslaboratorien des Landes zusammengeholten Instrumenten die ersten Untersuchungen im Gange.

Im Juli 1943 wurde *Oppenheimer* zum Direktor des Laboratoriums von Los Alamos ernannt. Unter seiner Leitung wurde das Innere einer Kernspaltungsbombe entwickelt und erprobt, das aus zwei Uran- oder Plutoniumhalbkugeln bestehen sollte, die erst im Augenblick der Zündung zu einer überkritischen Masse vereinigt werden. Die Bestimmung des Grenzwertes der kritischen Größe war eines der Hauptprobleme, an denen die theoretischen Abteilungen arbeiteten. Da viele Parameter nur näherungsweise ermittelt werden konnten, mußten die Rechnungen durch zahlreiche Experimente ergänzt werden, die die Einrichtung immer weiterer Versuchsanlagen erforderten.

So wuchs Los Alamos ständig. Ende 1943 arbeiteten und lebten dort etwa 3500 Menschen. Ein Jahr später waren es 6000. Unter ihnen Wissenschaftler von Rang und Namen: *Fermi*, *Lawrence*, *Bethe*, *Urey*, *Seaborg*, u. a. Neben *Chadwick*, dem Entdecker des Neutrons, fungierte auch *Nils Bohr* zeitweilig als Berater.

Ziel der USA: Bombenmonopol

Auch nach der Niederlage des faschistischen Deutschlands gingen die Arbeiten mit unvermindertem Tempo weiter, sie wurden eher noch beschleunigt. Die herrschenden Kreise der USA hofften, gestützt auf das Atombombenmonopol, die Bedingungen für die Weltpolitik diktieren zu können. Insbesondere die USA-Militärs waren von einer großen Furcht besessen: daß der Krieg zu Ende gehen könnte, bevor die Bombe fertiggestellt war. Auch das Veto verantwortungsbewußter Wissenschaftler, die die Hintergründe durchschauten, konnte sie nicht daran hindern, den Abwurf von Kernspaltungsbomben auf japanische Städte vorzubereiten. In der Nähe der kleinen Stadt Alamogordo wurde am 16. Juli 1945 die erste Kernspaltungsbombe erfolgreich getestet.

Das dürfen wir nie vergessen!

Kernspaltungsbomben auf friedliche Städte

Am 6. August 1945 warf ein amerikanisches Flugzeug vom Typ B-29 eine Kernspaltungsbombe über der japanischen Stadt Hiroshima ab. Die Explosion hatte ein die menschliche Vorstellungskraft übersteigendes Grauen zur Folge. Eine weitere Bombe dieser Art fiel am 9. August 1945 auf Nagasaki. Etwa eine halbe Million Menschen wurde dabei im Bruchteil einer Sekunde getötet oder verstümmelt. Für diese Abwürfe bestand keine militärische Notwendigkeit.
Die erste Atombombe traf eine ahnungslose Stadt, in der bis dahin etwa 300000 Menschen lebten. Da der Angriff nur durch einzelne Flugzeuge erfolgte, war nicht einmal Alarm gegeben worden. Welch ungeheure Menschenverachtung gehört dazu, eine friedliche große Stadt zum Experimentierfeld zu machen!
»Es gibt Sandwüsten, Steinwüsten, Eiswüsten. Hiroshima aber, oder genauer gesagt: der Platz, an dem sich Hiroshima einmal befunden hatte, war Ende August 1945 eine neue, eine besondere, erstmalige Art von Einöde: eine Atomwüste, vom homo sapiens geschaffen, unter ihrer schwarzgrauen Oberfläche noch die Spuren seiner Tätigkeit, die jammervollen Überreste seiner Gattung bergend«, schrieb der österreichische Schriftsteller und Physiker *Robert Jungk* unter dem Eindruck der zerstörten Stadt.
In den ersten Stunden nach der Katastrophe von Hiroshima wußte niemand in Japan, was sich dort ereignet hatte. Im frühesten offiziellen Bescheid wurde nach Tokio berichtet, Hiroshima sei von »einer kleinen Zahl von Flugzeugen« angegriffen worden, die eine »völlig neue Bombe« verwendet hätten.
Am 7. August 1945 wurde der bekannte japanische Kernphysiker *Yoshio Nishina*, ein Schüler *Bohrs* in das Hauptquartier des japanischen Generalstabs gerufen. Es sollte die Frage geklärt werden, ob die von den USA verbreitete Nachricht vom Abwurf einer Atombombe der Wahrheit entspricht oder eine Propagandameldung ist.

Augenzeugen berichten

An die Möglichkeit, daß eine solche Waffe gebaut werden könnte, hatte *Nishina* seit 1939 schon öfter gedacht und sogar schon Berechnungen über die zu erwartende Zerstörungskraft angestellt. Er erbot sich, selbst nach Hiroshima zu fliegen und seine Vermutungen an Ort und Stelle zu überprüfen. »Schon als ich die Schäden aus der Luft sah«, berichtete er bei Verhören durch Offiziere der

128 Hiroshima nach der Zerstörung



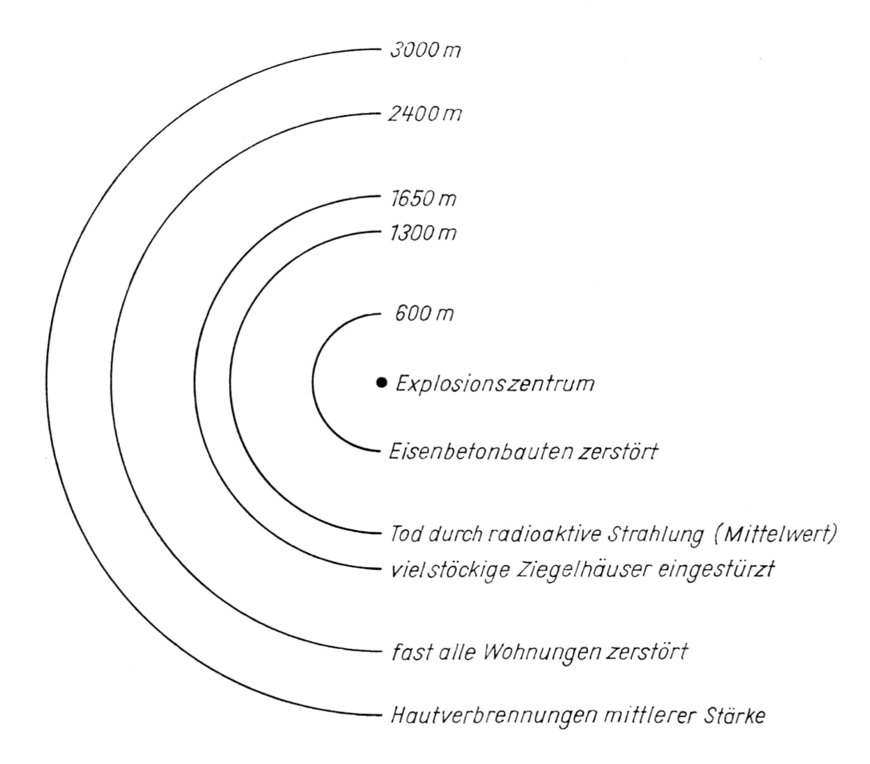
USA, „wußte ich, daß nur eine Atombombe solche Verwüstungen angerichtet haben konnte.«
Die Berichte von Augenzeugen über Szenen menschlichen Elends in der zerstörten Stadt, besonders die von Kindern, sind erschütternd.
Weitverbreitet sind auch jene Fotos, die Hiroshima nach der Katastrophe als menschenleere Trümmerwüste zeigen (Bild 128). Doch die Ruinenbilder täuschen. Es gab kein plötzliches Ende. Hiroshima war während der ersten Stunden und auch noch Tage danach kein stiller Friedhof, »sondern eine Stätte hunderttausendfacher Bewegung, millionenfacher Marter, morgens, mittags, abends erfüllt von Geheul, Geschrei, Gewimmer und verstümmeltem Gewimmel. Alle, die noch laufen, gehen, humpeln oder auch nur kriechen konnten, suchten nach irgend etwas: nach ein paar Tropfen Wasser, nach etwas Nahrung, nach Medizin, nach einem Arzt, nach den jämmerlichen Resten ihrer Habe, nach einem Unterschlupf. Und nach den Unzähligen, die nun nicht mehr leiden mußten, nach den Toten.«

Die Maße der Hölle

»Auch *Nishina* war von der Größe und Schrecklichkeit des Schauspiels ergriffen, aber während seiner Arbeit ließ er sich davon nichts anmerken. Er blieb der sachliche, genau rechnende, äußerlich kühle Forscher, der nicht die Leiden der Hölle, sondern ihre exakten Maße aufzuzeichnen hatte. Aus der Tatsache, daß die Dachziegel aller Häuser im Umkreis von sechshundert Metern vom Explosionszentrum an ihrer Oberfläche bis zu einer gewissen Tiefe geschmolzen waren, errechnete er die enormen Temperaturen, die sich entwickelt hatten. Aus den im Holz einiger Wände fixierten Schatten von Menschen und Dingen (um sie herum war alles vom überhellen Licht gebleicht und versengt) kalkulierte er fast exakt (mit einem Fehler von nicht einmal drei Prozent) die Höhe, in der die Bombe explodiert war. *Nishina* wühlte sogar in den Trümmern, die genau unter dem ‚Punkt Null' lagen, um sie auf ihre Radioaktivität zu untersuchen. Vier Monate später, im Dezember 1945, bedeckte sich sein ganzer Körper mit Blasen – wie er vermutete, eine späte Folge jener Überprüfung der noch auf dem Boden zurückgebliebenen Strahlung.
Der unermüdliche kleine Mann umfuhr die Stadt in einem großen Umkreis, um festzustellen, bis zu welcher Distanz Fensterscheiben unter dem Druck der Bombe zerbrochen waren; er besuchte eine Flakstellung auf der nahe bei Hiroshima gelegenen Insel Mukai-Shima, um sich von den Kanonieren eine Beschreibung des Angriffs geben zu lassen. Sie berichteten: ‚Es waren wirklich nur zwei B-29. Wir können einfach nicht glauben, daß sie die ganze Stadt zerstört haben.' «

Explosionswirkung der Bombe

Und doch war es so. Die Explosionsenergie der Bombe betrug 23 Millionen Kilowattstunden – freigesetzt in einigen Millionsteln einer Sekunde. Eine Kernwaffenexplosion wirkt aber nicht allein durch ihre Sprengwirkung, hinzu kommt die sehr intensive Wärmestrahlung und die radioaktive Strahlung. Bild 129 gibt einen annähernden schematischen Eindruck von dem Wirkungsbereich der Bombe von Hiroshima. Die gleiche Sprengwirkung erreicht man durch 20000 der allergrößten Bomben des zweiten Weltkrieges, die etwa eine Tonne TNT enthielten.
Um eine größtmögliche Zerstörung zu erzielen, wurde die USA-Bombe in einer Höhe von 600 Metern zur Explosion gebracht. Dadurch kam eine Druckwelle zustande, die einem Orkan mit einer Geschwindigkeit von 1500 km/h entspricht. Die Verwüstungen unmittelbar unter dem Explosionszentrum waren gewaltig. Noch in 4 km Entfernung waren alle Fensterscheiben zerbrochen, und noch an 13 km entfernten Gebäuden stellte man leichte Schäden fest.
Die explodierende Bombe erreichte Temperaturen von etwa 1000000 °C. Die sichtbare Sonnenoberfläche hat im Vergleich dazu »nur« 6000 °C. Die Hitzestrahlung entzündete im Umkreis von 2 km sofort alles brennbare Material. Viele Menschen erlitten schwere Verbrennungen.
Das Einwirken radioaktiver Strahlen von derartig hoher Intensität war den um



129 Wirkungsbereich der Atombombe von Hiroshima

das Leben Tausender Kranker ringenden japanischen Ärzten völlig neu. Die Intensität entsprach anfänglich der Strahlung, die mehrere Millionen Tonnen Radium aussenden. Bisher hatte man in den Krankenhäusern für die Behandlung von Krebsgewebe nur Bruchteile eines Gramms eingesetzt.

Strahlenkrankheit

Da die Ärzte die wahre Natur der ihnen vorliegenden Strahlensymptome nicht erkannten – sie waren von niemandem über die biologischen Nebenwirkungen der »neuen Bombe« informiert worden – behandelten sie häufig ihre Patienten ganz falsch. Tausende wurden, auf Grund von Fieber und blutigem Durchfall, als Ruhrkranke diagnostiziert. Als man hinter die wahre Ursache kam, war es für viele schon zu spät.
Die meisten Einwohner Hiroshimas, die starker radioaktiver Strahlung ausgesetzt waren, starben an der Zerstörung des blutbildenden Gewebes im Knochenmark, die eine Anämie zur Folge hat.
Und trotzdem: Das Leben ging weiter in den beiden japanischen Städten. Unermüdlich wurden die Folgen der Katastrophe beseitigt und die Städte zu neuem Leben erweckt.
»Hiroshima ist heute nicht wiederzuerkennen. Überall moderne Gebäude, Wohnviertel inmitten gepflegter Parks. Nagasaki ist mit Recht auf die Mitsubishi-Werft stolz, wo die größten Tankschiffe der Welt gebaut werden. Wie bescheiden wirken dagegen der Atom-Dom von Hiroshima und der enthauptete Christus von Nagasaki, Denkmäler der großen Tragödie. Und es fällt einem schwer, die Modelle und Pläne der atomverseuchten Zonen – Atomwüsten des 20. Jahrhunderts – mit den heute blühenden Städten in Einklang zu bringen«, berichteten Besucher im Jahre 1975.
Doch kann man Hiroshima jemals vergessen? Etwa 100000 Hibakusja, Überlebende der Atombombe, gibt es in der Stadt. Sie führen stets ein Papier bei sich, auf dem vermerkt ist, wieviel Meter sie vom Epizentrum der Explosion ent-

fernt waren. Können diese Menschen, deren Leben seit dem August 1945 nicht nach Jahren, sondern nach diesen Metern zählen, vergessen, was geschehen ist?

Zur Mahnung

Das Mahnmal in Hiroshima erinnert an 240000 Opfer, die sofort tot waren. Doch jeder neue Tag fügt dieser ungeheuren Zahl neue Opfer hinzu, die über 30 Jahre nach der Explosion an der heimtückischen und furchtbaren Strahlenkrankheit sterben.

Jedes Jahr am 9. August erstarrt Nagasaki zu einer Schweigeminute der Trauer. Nach dieser Minute ertönen die Glocken des Friedens, erst dann wird die Stille von den Sirenen der Betriebe und Schiffe in der Bucht unterbrochen. Doch dieser Frieden ist nur sicher und dauerhaft, wenn die bisher erreichten Teilerfolge des politischen Entspannungsprozesses zu einer allgemeinen und vollständigen Abrüstung, in eine Welt ohne Kernwaffen führen.

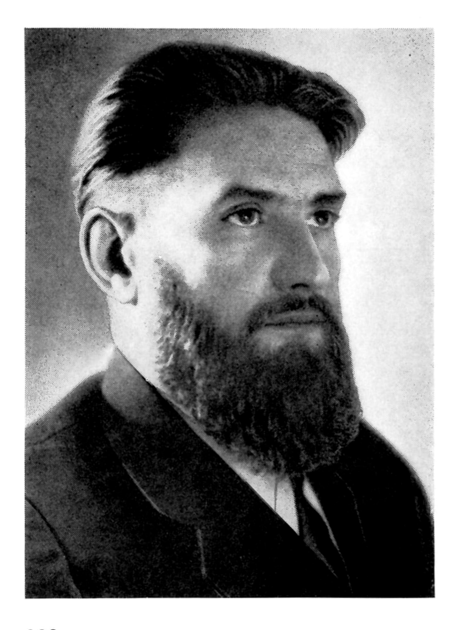
Durchbrechung des Atombombenmonopols

Bedeutung erkannt

Ende 1940 unterbreitete *I. W. Kurtschatow* (Bild 130) dem Präsidenten der Akademie der Wissenschaften der UdSSR einen Bericht, in dem er auf die wirtschaftliche und militärische Bedeutung der Energieerzeugung durch die Kernspaltung hinwies. Die sowjetischen Physiker erarbeiteten einen detaillierten Plan für die weiteren Arbeiten auf dem Gebiet der Kernforschung, die schon seit den dreißiger Jahren intensiv in einer ganzen Reihe von Instituten betrieben worden waren und zahlreiche Erfolge brachten. Insbesondere war der Bau einer Anlage vorgesehen, in der die Realisierung der Kettenreaktion der Kernspaltung mit natürlichem Uran möglich sein sollte, also die Errichtung eines Kernreaktors. Es war geplant, den Mechanismus des Ablaufs der Kettenreaktion in allen Einzelheiten zu untersuchen und die Möglichkeit der Erzeugung von neuem Spaltmaterial mittels Neutroneneinfang durch Uran 238 zu prüfen.

Zweiter Weltkrieg unterbricht Forschungen

Der Überfall des faschistischen Deutschland unterbrach 1941 jäh diese zukunftsreiche Entwicklung. Die Wissenschaftler gingen teils an die Front, teils nahmen sie an verschiedenen Stellen des Landes Arbeiten auf, die unmittelbaren Nutzen für die Verteidigung des Landes hatten. Erst im Februar 1943 konnte die Kernforschung fortgesetzt werden, doch unter welch erschwerenden



130 Igor Wassiljewitsch Kurtschatow, der Wegbereiter der sowjetischen Kernforschung

Bedingungen! Der Krieg hatte der Sowjetunion tiefe Wunden geschlagen, es fehlte überall am Nötigsten. Soweit es noch möglich gewesen war, hatte man bei Kriegsausbruch die wertvollen Laboratorien in östliche Gebiete evakuiert. Die neuen Untersuchungen erforderten jedoch weit umfangreichere und kostspieligere Ausrüstungen.

Die Sowjetregierung verfügte seit 1942 bereits über Informationen, daß im faschistischen Deutschland und in den USA unter strengster Geheimhaltung intensiv an einer neuen Waffe mit gewaltiger Wirkung gearbeitet wurde. Daraufhin waren die führenden Physiker *Joffe*, *Wernadski*, *Chlopin* und *Kapiza* nach Moskau gerufen worden, um die neue Lage und die Aussichten entsprechender Entwicklungen in der Sowjetunion zur Verteidigung des ersten sozialistischen Staates zu beraten.

Ausarbeitung Fljorows

Dem Staatlichen Verteidigungskomitee lag außerdem eine Ausarbeitung von *Fljorow* vor, in der dieser Argumente dafür anführte, daß eine Kernexplosion realisierbar sei und dafür das leichte Isotop des Urans und des Protaktiniums geeignet wären. Er unterbreitete Vorschläge für die Mittel und Möglichkeiten, durch die am schnellsten eine Kernexplosion verwirklicht werden könne und erhob die Forderung, unverzüglich mit der Herstellung der Uranbombe zu beginnen.

Von der sowjetischen Regierung wurde das Projekt der Schaffung einer Uranbombe beschlossen und, auf *Joffes* Vorschlag, *Kurtschatow* mit der Leitung beauftragt.

Kurtschatow organisiert die Arbeit

Mit einer kleinen Gruppe von Wissenschaftlern – *Kikoin*, *Seldowitsch*, *Alichanow* und *Fljorow* – begann *Kurtschatow* die Arbeit zu organisieren. Zunächst wurde der Bau eines Kernreaktors und parallel dazu die Ausarbeitung von Verfahren für die Isotopentrennung in Angriff genommen. Ein gründlich ausgewählter erweiterter Mitarbeiterkreis ermöglichte dann ein Vorgehen auf breitester Ebene. Das gesamte Kollektiv, das von der außerordentlichen Bedeutung des Projekts überzeugt war, arbeitete mit selbstlosem Einsatz und großer Beharrlichkeit.

»Mitte Juli 1945 traf die Nachricht von einer Explosion ungeheuren Ausmaßes auf dem Versuchsgelände von Alamogordo in den USA ein. *Kurtschatow* und seine Mitarbeiter nahmen diese Meldung mit gemischten Gefühlen auf. Sie empfanden Verdruß darüber, daß es die Amerikaner früher als sie geschafft hatten. Sie empfanden Genugtuung, da nun die Möglichkeit der sich selbst aufrechterhaltenden explosiven Kernreaktion erwiesen war und die Bemühungen der sowjetischen Wissenschaftler zum Ziel führen würden. Niemand konnte *Kurtschatow* mehr vorhalten, daß er sich einem erfolglosen Vorhaben verschrieben hätte und große Mittel in einer für das Land so schweren Periode vergeudet worden wären. Schließlich waren sie voller gespannter Aufmerksamkeit, da Amerika nichts über die weiteren Absichten in bezug auf diesen gewaltigen Erfolg von Wissenschaft und Technik verlauten ließ. Würde man Atomstationen bauen, die Atomenergie für andere friedliche Zwecke verwenden?

Alle Erwartungen auf einen dauerhaften Frieden und den Sieg der Vernunft wurden hinfällig, als zwanzig Tage nach Alamogordo die Explosionen von Hiroshima und danach von Nagasaki erfolgten«, berichtet *I. N. Golowin* in seiner Kurtschatow-Biografie.

Notwendige Antwort

Als die Nachricht der amerikanischen Atombombenabwürfe um die Welt ging, konnte es für die sowjetische Regierung trotz der durch den Krieg bedingten Lage im Lande nur eine Entscheidung geben. Mit allen Mitteln, die unter diesen Umständen dem durch den Krieg aufs härteste geprüften sowjetischen Volk entzogen werden mußten, beschleunigte die Sowjetunion die Arbeiten zur Entwicklung einer eigenen Kernspaltungswaffe, um die zu erwartenden Erpressungen durch das Bombenmonopol der USA auszuschalten.

Der Plan sah vor, nach der Sicherung der Plutoniumproduktion mit einem möglichst präzisen Modell der Bombe die Berechnungen zur Entwicklung einer

Kettenreaktion mit schnellen Neutronen zu überprüfen. Dann sollte der Test auf dem Versuchsgelände erfolgen.
Im Frühjahr 1946 wurde die zum Laboratorium 2 am Moskauer Stadtrand gehörende »Montagewerkstatt« vollendet, in der die entscheidenden Versuche zum Aufbau eines graphitmoderierten Kernreaktors begannen. Im Dezember hatte man Hunderte Tonnen Uran und Graphit zum fünften Mal zusammengesetzt und erreichte am 25. Dezember 1946 den kritischen Zustand des Systems. Damit war eine wesentliche Arbeitsetappe erfolgreich abgeschlossen.

Erster kritischer Reaktor in Europa

Elf Jahre später schrieb *Kurtschatow*: »Ich erinnere mich an die Erregung, die mich und meine Mitarbeiter erfaßt hatte, als es uns gelungen war, zum erstenmal auf dem europäischen Kontinent eine Kettenreaktion in einem Uran-Graphit-Reaktor zu verwirklichen.
In erster Linie wurden die grenzenlosen Kernkräfte auf die Herstellung einer verheerenden Waffe gerichtet. Ich war jedoch wie alle sowjetischen Wissenschaftler davon überzeugt, daß der gesunde Menschenverstand siegen würde und die Zeit nicht fern war, wo man das kostbare Uran 235 und Plutonium für Atomtriebwerke friedlicher Schiffe und Flugzeuge, für Kraftwerke, die in die Wohnungen der Menschen Licht und Wärme bringen, verwenden würde.«
Ende 1946 ging es jedoch noch nicht um die friedliche Nutzung der Kernenergie, denn reaktionäre Kreise in den USA riefen offen zum Atomkrieg gegen die Sowjetunion auf. Deshalb mußte als Gegengewicht in kürzester Frist die eigene Kernspaltungsbombe geschaffen werden.
Weitere Kernreaktoren, insbesondere zur Plutoniumproduktion, wurden in Betrieb genommen, und bereits nach knapp drei Jahren, am 29. August 1949, fand in Ostsibirien unter Leitung *Kurtschatows* der Test einer sowjetischen Kernspaltungsbombe statt. Er verlief erfolgreich. Das USA-Monopol war gebrochen und damit die Kriegsgefahr wesentlich verringert.

Erfolgreicher Test

Der Mechanismus

Trotz verheerender Wirkung haben Atombomben ein verhältnismäßig einfaches Funktionsprinzip. Es setzt aber die Kenntnisse über die Kernspaltung voraus und über die Möglichkeit, diesen Prozeß als Kettenreaktion ablaufen zu lassen.
Am 26. Januar 1939 referierte *Bohr* auf einer Konferenz in Washington über *Hahns* gelungene Kernspaltung. Das Experiment wurde allerorts bestätigt und machte Schlagzeilen in vielen Zeitungen der Welt. »Mit einem Schlage wußten im März 1939 etwa 200 Wissenschaftler in allen großen Ländern von der Möglichkeit von Atombomben«, stellte der Kernforscher *C. F. von Weizsäcker* zurückblickend auf diese Zeit fest.

Alle wußten um die Möglichkeit

In jedem Lexikon findet man heute eine Kurzbeschreibung: »Atombombe, beruht auf explosionsartigem Ablauf der Kernspaltung (Kettenreaktion), wenn im Zeitpunkt der Zündung eine so große Masse reinen spaltbaren Materials vereinigt wird, daß jedes freigewordene Neutron eine neue Kernspaltung veranlaßt.«

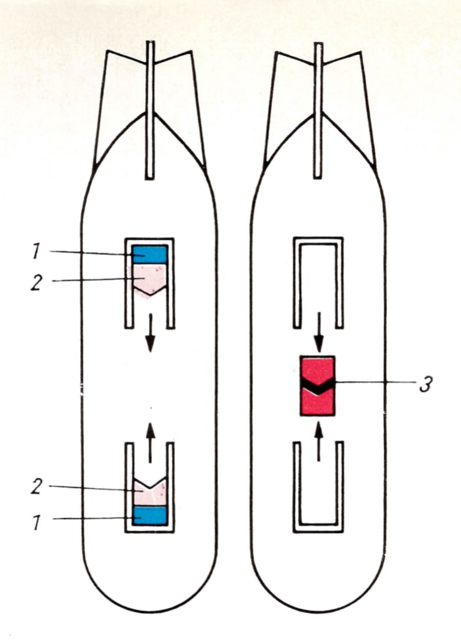
Antwort des Lexikons

Auch die Voraussetzungen für die Herstellung werden genannt: Eine ausreichende Menge geeigneten spaltbaren Materials und genaue Kenntnisse über den zeitlichen Ablauf der Kettenreaktion der Kernspaltung in einer überkritischen Anordnung.
Das klingt alles sehr einfach, doch um die ersten drei Atombomben herzustellen, mußten beispielsweise die USA mehr als zwei Milliarden Dollar aufwenden. Hunderttausende von Menschen haben fast vier Jahre daran gearbeitet.
Aus verständlichen Gründen werden genaue Einzelheiten nicht veröffentlicht. Doch etwas mehr als die Grundvoraussetzungen und die recht vereinfachten Darstellungen in Nachschlagewerken ist heute schon allgemein bekannt.

Prinzip der Bombe

Bei einer Kernspaltungsexplosion muß für eine maximale Energiefreisetzung alles so angelegt sein, daß sich die Kettenreaktion der Kernspaltung, sobald

131 Prinzip der Kernspaltungsbombe
1 chemische Sprengladung; 2 unterkritische Teile aus Spaltmaterial; 3 zusammengeschossene überkritische Masse



sie einmal begonnen hat, mit möglichst großer Geschwindigkeit fortpflanzen und ausbreiten kann. Um das zu erreichen, bringt man in einer festen Umhüllung mittels einer chemischen Sprengladung zwei unterkritische Teile aus reinem Spaltstoff so rasch wie möglich zu einer überkritischen Masse zusammen (Bild 131). Durch gleichzeitiges Einschalten einer Neutronenquelle kann der Anfangswert der Neutronendichte wesentlich vergrößert werden.

Die große Geschwindigkeit ist notwendig, da bei langsamer Annäherung der Teile auch die Neutronendichte und die Wärmeentwicklung nur langsam zunehmen. Auf diese Weise bliebe genügend Zeit für das Auseinandertreiben der reagierenden Masse infolge der Erhitzung, ehe der kritische Zustand wesentlich überschritten wird. Die freigesetzte Explosionsenergie wäre ziemlich gering.

Prompte Neutronen

Man stützt sich außerdem ausschließlich auf die unmittelbar bei der Spaltung entstehenden prompten Neutronen und macht die Anordnung allein mit diesen Neutronen so stark überkritisch wie zulässig, damit sich in kürzester Zeit möglichst viele Neutronengenerationen entwickeln können. Die begrenzte Zeitspanne, die für die Neutronenvermehrung zur Verfügung steht, wird bestimmt durch die Größe der Massenträgheit des Spaltstoffs gegenüber dem Auseinanderfliegen. Sie liegt in der Größenordnung einer Millionstel Sekunde. Die Lebensdauer der Neutronen in einer Bombe beträgt etwa 10^{-9} s, so daß sich in der verfügbaren Zeit mehr als 1000 Generationen entwickeln können.

Schnelle Neutronen

Für die rapide Vermehrung der Neutronen ist es wesentlich, daß nur die schnellen Neutronen, die mit der erforderlichen Geschwindigkeit den Prozeß der Kernspaltung weitervermitteln, eine Rolle spielen. Weiterhin muß vorausgesetzt werden, daß möglichst jeder Atomkern des Spaltstoffs mit einer Spaltung reagiert, wenn er von einem schnellen Neutron getroffen wird. Deshalb sind für Kernexplosionen nur Spaltstoffe geeignet, bei denen andere Prozesse mit schnellen Neutronen nur wenig mit der Spaltung konkurrieren.

Uran 238 scheidet bei dieser Auswahl aus, da, wie schon bemerkt, von fünf auftreffenden schnellen Neutronen nur eins den Kern spaltet. Da das natürliche Uran zu über 99% Uran 238 enthält, gilt hierfür sinngemäß dasselbe. Bessere Verhältnisse in dieser Hinsicht finden wir dagegen beim Uran 235, Plutonium 239 und Uran 233 vor, die deshalb alle als Kernsprengstoff in Frage kommen.

Isotopentrennung

Es ist jedoch sehr aufwendig, z. B. mittels Gasdiffusion durch Trennwände das Uran 235 aus dem natürlichen Uran abzutrennen. Zuerst muß das Uran zu

diesem Zweck in eine gasförmige Verbindung, in Uranhexafluorid, umgewandelt werden. Die Anreicherung des leichteren Isotops Uran 235 gegenüber dem schweren Isotop Uran 238 beträgt in einem Diffusionsgang etwa 0,4%. Um zu fast reinem Uran 235 zu gelangen, waren deshalb annähernd 5000 Trennstufen hintereinander zu schalten, was viele Kilometer Trennwände mit Tausenden von Pumpen erforderte. Über die notwendigen Anstrengungen zur Erzeugung von Plutonium 239 und Uran 233 in Brutreaktoren war schon ausführlich berichtet worden.

Plutoniumgemisch ist kein Kernsprengstoff

Es wurde auch schon angedeutet, daß sich nach längerer Betriebszeit in einem Reaktor außer Plutonium 239 noch höhere Plutoniumisotope durch aufeinanderfolgenden Neutroneneinfang bilden, die eine Verwendung des erbrüteten Materials als Kernsprengstoff ausschließen. Das liegt begründet in der hohen spontanen Spaltungsrate dieser Isotope, deren Kerne auf Grund ihrer Zusammensetzung schon ohne äußeren Anstoß sehr stark zu Spaltungen und damit verbundener Neutronenfreisetzung neigen. Beim Zusammenschießen zweier unterkritischer Teile aus Plutoniumgemisch zu einer überkritischen Masse kommt infolge der vorher reichlich vorhandenen Neutronen die Kettenreaktion schon in Gang, ehe beide Teile zusammentreffen. Die Folge ist, daß ähnlich wie beim zu langsamen Zusammenführen von reinem Spaltmaterial das Plutoniumgemisch nur wenig überkritisch wird und ohne größere Kraft auseinandertreibt.

Gegenwärtig wird der größte Teil des Plutoniums in Druckwasserreaktoren erzeugt. Üblich ist ein mindestens einjähriger Betrieb bis zur Brennstofferneuerung. In dieser Zeit wächst der Anteil der höheren Plutoniumisotope so stark, daß eine Verwendung des aus dem Brennstoff abtrennbaren Plutonium als Kernsprengstoff völlig ausgeschlossen ist. Das Plutonium kann jedoch wiederum als Brennstoff für andere Reaktoren oder eine neue Beladung verwendet werden.

Wie groß die Menge des in einer Atombombe eingesetzten Spaltmaterials ist, wurde nie mitgeteilt. Die Ansichten schwanken zwischen 10 und etwa 30 kg. Trotz aller Anstrengungen gelingt es nicht, mehr als einige Prozent des Spaltstoffs der Bombe zur Reaktion zu bringen, der Rest verdampft ungespalten.

Begrenzte Wirkung

Es war angegeben worden, daß sich um so mehr Neutronengenerationen in der verfügbaren Zeit entwickeln können, je stärker die Gesamtmasse überkritisch ist. Mehr Neutronen bedeuten mehr Kernspaltungen und damit eine größere Freisetzung von Explosionsenergie. Der Überkritizität sind aber dadurch Schranken gesetzt, daß die Teilmassen für sich in jedem Fall unterkritisch sein müssen. Deshalb ist die Explosionsenergie für Kernspaltungsbomben begrenzt und liegt maximal in der Größenordnung von 100 kt TNT-Äquivalent.

Die Wasserstoffbombe

»Erinnert man sich an die Wirkung der Atombomben auf Hiroshima und Nagasaki im August 1945, dann sollte man meinen, daß die Menschen es mit der Möglichkeit der Verwertung der Atomenergie für destruktive Zwecke eigentlich schon genügend ‚herrlich weit gebracht' haben und kein Bedarf dafür sei, diesen Mitteln noch weit stärkere, furchtbarere anschließen zu wollen. Und doch scheint dies der Fall zu sein«, schrieb *Otto Hahn* im Jahre 1950.

Einige Monate zuvor hatte der USA-Präsident *Truman* angeordnet, daß mit der Entwicklung und dem sofortigen Bau der Wasserstoffbombe offiziell begonnen werden soll, um damit ein neues »Druckmittel zur Erhaltung des Weltfriedens« in der Hand zu haben.

Was kann man sich unter einer Wasserstoffbombe vorstellen?

Woher stammt die Sonnenenergie?

Bereits Ende der zwanziger Jahre hatten *Atkinson* und *Houtermanns* die Vermutung ausgesprochen, daß die Sonnenenergie aus der Verschmelzung leichter Atomkerne erklärt werden könne. Durch Berechnungen von *Bethe* und *Weiz-*

säcker kann man sich heute über die Kernprozesse, die im Innern der Sonne vor sich gehen, ein recht klares Bild machen.
Verwandelt sich Wasserstoff in das Gas Helium – das in der Sonne zuerst entdeckt und nach dem griechischen Sonnengott Helios benannt wurde –, so tritt dabei ein sogenannter Masseverlust auf. Die vier Wasserstoffatomkerne, die sich dabei zusammenschließen, haben eine etwas größere Masse als der entstehende Heliumatomkern. Die Massendifferenz wird nach der Einsteinschen Relation als Energie »zerstrahlt«. Eine Energiefreisetzung dieser Art hatten wir schon im Zusammenhang mit dem Aufbau mittlerer Kerne aus leichten Kernen besprochen (s. S. 34).
Da die Kerne auf Grund ihrer positiven Ladungen einander abstoßen, müssen sie sich, um sich zusammenschließen zu können, erst einander nähern. Dazu bedarf es einer außerordentlich hohen Bewegungsenergie. Das ist aber erst bei Temperaturen von einer Million Kelvin oder mehr der Fall. Deshalb nennt man eine Kernverschmelzung auch eine thermonukleare Reaktion.

Temperatur der Sonne

Für die Temperatur im Innern der Sonne hatte man schon früher etwa 20 Millionen Kelvin errechnet. Unter Mitwirkung von Kohlenstoff als Katalysator wird hier der Wasserstoff allmählich zu Helium aufgebaut. Der Reaktionsmechanismus führt nämlich über verschiedene Stufen, in denen radioaktive Kerne zerfallen müssen, ehe der Zyklus weiterlaufen kann. Dadurch ist gewährleistet, daß das Tempo der Reaktion nicht beliebig anwächst und die Sonne seit mehreren Milliarden Jahren ihre Temperatur aufrecht erhalten konnte.
Die langsame Kernverschmelzung von Wasserstoff, wie sie im Innern der Sonne abläuft, können wir auf der Erde nicht nachmachen. Es gibt keine Materialien, die Temperaturen von etwa 20 Millionen Kelvin und Drücke von 90 TPa auf die Dauer aushalten könnten.
Es ist jedoch möglich, daß man unter irdischen Bedingungen einen etwas anderen Reaktionsverlauf realisieren kann. Er spielt sich aber explosionsartig ab und ist nicht steuerbar.

Wasserstoffusion

Schon länger war bekannt, daß sich die schweren Wasserstoffisotope Deuterium und Tritium unter wesentlich günstigeren Bedingungen zusammenfügen lassen als der normale Wasserstoff. Deuterium reagiert bei einer Temperatur von 100 Millionen Kelvin innerhalb von 30 Mikrosekunden, ein geeignetes Gemisch von Deuterium und Tritium schon nach einer Mikrosekunde. Das entspricht den Reaktionswerten, wie sie mit den am weitesten entwickelten Kernspaltungsbomben erreicht werden.
Setzt die Reaktion einmal ein, so wird die freigesetzte Energie die Temperatur der beteiligten Stoffe noch weiter erhöhen und dadurch den Prozeß beschleunigen. Es kommt zu einem explosionsartigen Ablauf, bei dem die Synthese des Heliums ununterbrochen erfolgt und sich in kurzer Zeit eine große Energie entwickelt. Wesentlich dabei ist außerdem, daß im Gegensatz zur Kernspaltungsbombe die umsetzbare Gesamtmenge aus theoretischer Sicht unbegrenzt ist.

Die H-Bombe

Eine Wasserstoffbombe wird man sich also als einen Behälter vorstellen müssen, in dem sich Deuterium oder Tritium befindet, das mit einem Zünder in Form einer Kernspaltungsbombe zur Explosion gebracht wird. Da die Ausgangsmenge an Deuterium oder Tritium beliebig groß sein darf, sind theoretisch der Explosionsenergie der Wasserstoffbombe keine Grenzen gesetzt.
Die ersten Überlegungen zur »Superbombe« stellte man in den USA schon im Sommer 1942 an. *Oppenheimer* hatte eine kleine Gruppe von Physikern zusammengerufen, um mit ihnen über das beste Modell der Atombombe zu beraten. Besonders von *Teller* wurde dabei auf die Möglichkeit einer thermonuklearen Bombe hingewiesen.

Berechnungen

So stand die Richtung des Weges zur Wasserstoffbombe schon lange fest, ehe man 1950 mit einer beschleunigten Entwicklung begann. Das Ziel war aber nicht so ohne weiteres erreichbar. »Schon bei der Berechnung der Atombombe waren Tausende und Abertausende von Detailkalkulationen notwendig gewesen, aber

die exakte Bestimmung einer thermonuklearen Explosion würde um viele Grade schwieriger werden. Denn es galt, einen durch zahlreiche Stadien gehenden physikalischen Vorgang, der sich in einer millionstel Sekunde abspielen mußte, mit der größtmöglichen Präzision vorauszusehen und nach diesen Annahmen einen unendlich komplizierten Mechanismus zu konstruieren.« Eine von dem ungarischen Mathematiker *J. von Neumann* entwickelte neuartige und sehr schnell arbeitende Rechenmaschine wurde zum unentbehrlichsten Arbeitsinstrument.

Bei der Wahl von Deuterium oder Tritium als Ausgangsstoff zur Kernverschmelzung entstehen Probleme dadurch, daß beide Stoffe normalerweise gasförmig auftreten und daher ein sehr großes Volumen beanspruchen. Eine thermonukleare Reaktion ist aber erst bei einer genügend hohen Konzentration möglich. Das macht eine Verflüssigung des Deuteriums oder Tritiums erforderlich, die aber erst bei Temperaturen unter —240 °C eintritt.

Unterkühltes Laboratorium

Als erstes Exemplar einer Wasserstoffbombe entstand deshalb auf Grund der genannten Schwierigkeiten kein richtiges Geschoß, sondern mehr ein thermonukleares Laboratorium, das insgesamt nicht weniger als 65 t wog, wobei die aufwendige Kühlanlage den größten Anteil hatte. Das Monstrum wurde im November 1952 auf dem Eniwetok-Atoll des Pazifik an einem 60 m hohen Stahlturm zur Explosion gebracht. Der Feuerball wuchs bis zu einem Durchmesser von fast 6 km. Als die riesige pilzförmige Rauchwolke zum Himmel stieg, stellte man fest, daß sich durch die freigewordene Energie von etwa drei Millionen Tonnen Dynamit ein Krater von 1,5 km Durchmesser und 60 m Tiefe aufgetan hatte.

Testexplosion

Mit dieser erfolgreichen Testexplosion hatte man zum ersten Male praktisch nachgewiesen, daß auf der Erde thermonukleare Reaktionen möglich sind. Das Versuchsmuster war aber für eine militärische Verwendung völlig unbrauchbar. Man arbeitete deshalb intensiv an einer anderen Variante, die man etwa Mitte 1951 entdeckt hatte, der »trockenen« Bombe.

Es ist nämlich möglich, die Kühlung einzusparen, wenn man das Deuterium chemisch bindet, wobei ein fester Stoff entsteht. Geeignet ist dazu das Metall Lithium. Mit Deuterium verbunden ergibt es das Lithiumdeuterid, eine salzartige weiße Substanz, die je Raumeinheit sehr viel Deuterium enthält und ohne größeren Aufwand aufbewahrt werden kann. Doch ehe es zum Abschluß der Entwicklung kam, ereignete sich etwas, was die US-Amerikaner sehr beunruhigte.

Überraschung für die USA

Am 8. August 1953 teilte auf einer Tagung in Moskau der Vorsitzende des Ministerrates der UdSSR *G. M. Malenkow* dem Obersten Sowjet mit, daß sich die USA irrtümlich als Monopolisten der Wasserstoffbombe fühlen. Die Schlagzeilen der westlichen Presse mit dieser Meldung waren noch bis zum 12. August mit einem Fragezeichen versehen. An diesem Tage stellte eine »RD«-Patrouille (»Radiation Detection«) der USA über dem asiatischen Teil der Sowjetunion Spuren einer neuen Bombenexplosion fest. Die Analyse der aufgefangenen Proben ergab, daß sie von einer »trockenen« Bombe stammten. Anders als die USA entwickelten die sowjetischen Physiker ohne Umwege eine transportable Bombe mit Lithiumdeuterid. In etwas mehr als drei Jahren hatten sie unter der zielstrebigen Leitung von *Kurtschatow* ihr Ziel erreicht.

»Nach dem Verlust des amerikanischen Atombombenmonopols im Sommer 1949 war der erste erfolgreiche Test einer transportablen Wasserstoffbombe für die weitere Veränderung des internationalen Kräfteverhältnisess von fundamentaler Bedeutung. Die Explosion vom 12. August 1953 machte den Verfechtern eines atomaren Präventivkrieges unmißverständlich klar, daß das Land des siegreichen Sozialismus einen militärstrategischen Vorsprung besaß. Damit wurde der Weltfrieden sicherer, und die aggressivsten Kräfte des internationalen Finanzkapitals mußten eine weitere Einengung ihres Spielraums hinnehmen.«

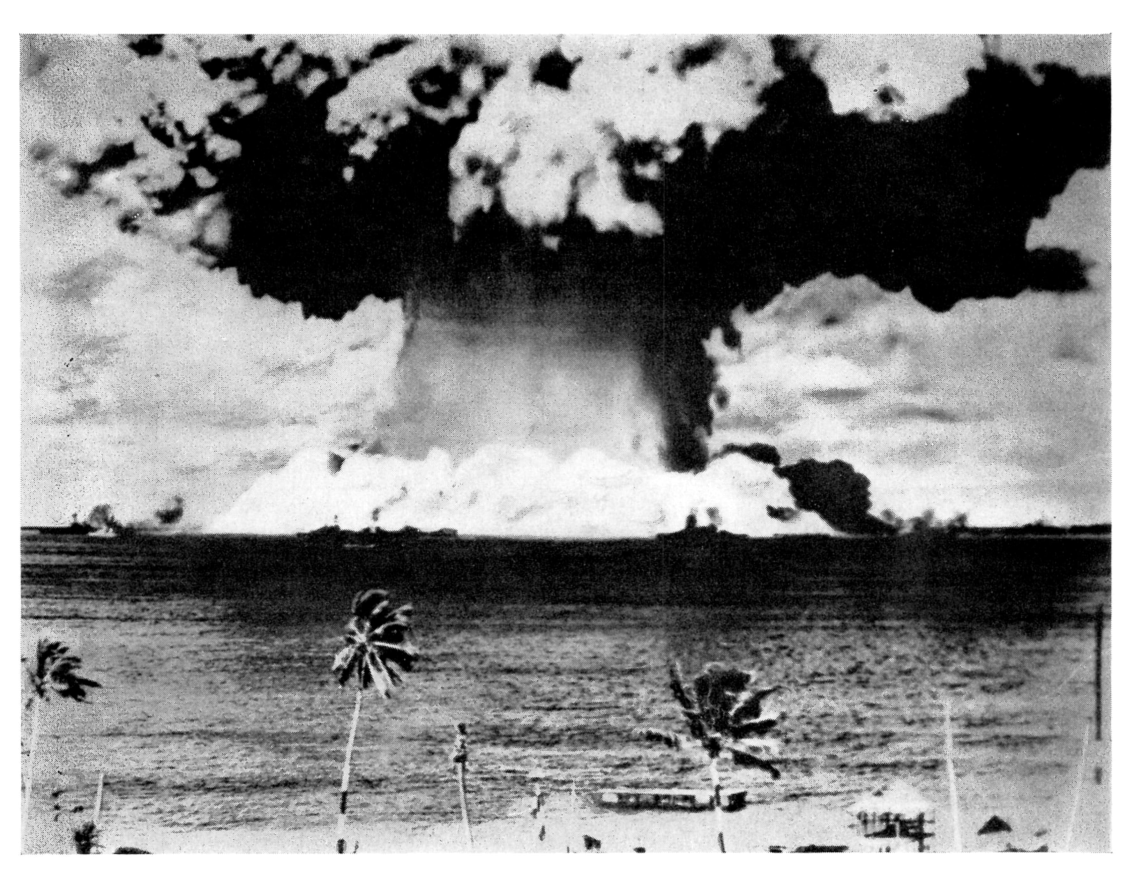
Kampf gegen Bombentests und für Abrüstung

Heute haben Wasserstoffbomben etwa die tausendfache Sprengkraft der Bombe von Hiroshima (Bild 132). Die größten bisher bekannt gewordenen thermonuklearen Bomben weisen ein TNT-Äquivalent von 100 Millionen Tonnen auf. Eine dieser Wasserstoffbomben setzt bei ihrer Explosion eine Energiemenge frei, die sechsmal größer ist als die Summe der Energien aller Bomben und Granaten, die von den kriegführenden Staaten zusammen während des zweiten Weltkrieges eingesetzt worden sind.

Kernspaltungsbombe als Zünder

Da bei reiner Kernfusion keine radioaktiven Spaltprodukte entstehen, wird die Wasserstoffbombe von imperialistischen Militärs irreführend als »saubere« Bombe bezeichnet. Diese Demagogie ist leicht zu widerlegen. Jede Wasserstoffbombe benötigt einen Zünder in Form einer Kernspaltungsbombe, die unvermeidlich radioaktive Spaltprodukte hinterläßt. Das gilt auch für die sogenannten Neutronenbomben, die nach den bekannt gewordenen Beschreibungen als kleine Wasserstoffbomben angesehen werden können und deren Fusionsenergie auf 1 bis 10 kt TNT-Äquivalent (Trinitrotoluol-Äquivalent) geschätzt wird. Solche Kernwaffen mit verstärkter Strahlung haben gegenüber den Standardkernwaffen mit gleich großen Spaltsprengköpfen einen etwa 50 Prozent größeren Wirkungsradius der unmittelbar erzeugten schnellen Neutronenstrahlung bei nur 10 Prozent der Stoßwellen- und thermischen Wirkung.
Die intensive schnelle Neutronenstrahlung entsteht bei der thermonuklearen

132 Wasserstoffbombenversuch der USA im Bikiniatoll kurz nach der Explosion



Reaktion als Nebenprodukt und kann die Atomkerne der näheren Umgebung zu einer intensiven radioaktiven Strahlung anregen. Beispielsweise wurde bei der Explosion einer amerikanischen Wasserstoffbombe am 1. März 1954 das Kalkgestein einer Südseeinsel durch die Neutronenbestrahlung in radioaktives Kalzium verwandelt, das gleichzeitig verdampfte.

Bei der Explosion einer Neutronenbombe würde eine für Menschen tödliche Dosis von 80 bis 180 Gy (Gray) in einem Wirkungsradius von etwa 1000 m erreicht werden und alle sich dort aufhaltenden Personen nach wenigen Minuten handlungsunfähig machen. Der Tod würde nach Stunden oder Tagen qualvollen Leidens eintreten. Den Überlebenden in einem weiteren Umkreis und sogar noch allen, die kleineren Strahlendosen als 2 Gy ausgesetzt waren, drohen schwerwiegende genetische Schäden. Noch nach 10 Generationen können geschädigte Kinder geboren werden. Diese zutiefst menschenfeindlichen Eigenschaften und die Pläne der USA-Regierung zur Produktion der Neutronenwaffen und zu ihrer Stationierung in westeuropäischen Ländern haben in der ganzen Welt eine Flut von Protesten ausgelöst. Inzwischen unterschrieben Millionen Menschen den Aufruf des Weltfriedensrates zur Ächtung dieser Waffe.

Teststopp für Kernwaffen

Ein jahrelanger mühsamer Kampf aller friedliebenden Kräfte und die Überwindung vieler Schwierigkeiten waren notwendig, bis es im Sommer 1963 gelang, in aller Form eine Vereinbarung über den Teststopp von Kernwaffen abzuschließen. Damit wurde die Menschheit von den Gefahren des zunehmenden radioaktiven Niederschlags befreit, der in den Jahren nach der Beendigung der Versuche in der Atmosphäre in allen Teilen unseres Erdballs sprunghaft sank.

Der »Vertrag über das Verbot der Kernwaffenversuche in der Atmosphäre, im kosmischen Raum und unter Wasser«, der nach dem Entwurf eines sowjetischen Vorschlags im Juli 1963 in Moskau ausgearbeitet und am 5. August dort von den Außenministern Großbritanniens, der UdSSR und der USA unterzeichnet wurde, bedeutete einen großen Sieg der friedliebenden Kräfte. Binnen weniger Monate unterzeichneten mehr als einhundert Staaten den Moskauer Vertrag, der in seiner Präambel auf das Hauptziel, die allgemeine und vollständige Abrüstung, hinwies.

Es darf aber nicht verkannt werden, daß der genannte Vertrag nur einen ersten Schritt darstellt. Heute setzt sich die Entspannung zwar fortschreitend durch, hat aber noch keineswegs universelles Ausmaß erreicht. Weitere Erfolge werden sich nur in einem allmählichen Prozeß erreichen lassen. Es würde jedoch die Bemühungen der Friedenskräfte sehr in Frage stellen, wenn sie die ersten möglichen Schritte unterlassen, weil weitergehende Maßnahmen noch nicht erreichbar sind. Außerdem haben derartige Vereinbarungen auch sehr erhebliche positive politisch-psychologische Auswirkungen, indem sie bessere Voraussetzungen für den Abschluß weitergehender Abkommen schaffen.

Vertrag über Nichtweiterverbreitung

Der Vertrag über die Nichtweiterverbreitung von Kernwaffen war ein nächster Schritt. Leider gehören zwei der fünf Kernwaffenmächte, nämlich Frankreich und China, nicht zu den Unterzeichnern der beiden Verträge. Außerdem muß festgestellt werden, daß 10 Jahre nach Inkrafttreten des Teststoppvertrages für Kernwaffen am 5. August 1963 insgesamt mindestens 456 Kernexplosionen erfolgt sind. Das bedeutet, daß in jedem Jahr mehr Kernexplosionen als in der Zeit vor dem Vertrag durchgeführt wurden. 49 Tests fanden in der Atmosphäre statt; sie wurden durch Frankreich und China ausgelöst. Im übrigen erklärt sich die hohe Zahl aus einer Zunahme der unterirdischen Tests von anfangs 98 Explosionen auf 408 in der Zeit von 1963 bis 1973. Diese Tatsachen unterstreichen zweifellos sehr nachdrücklich, welche Gefahrenquellen noch bestehen und welche großen Aufgaben hier noch zu lösen sind.

Kampf für die Abrüstung

Furchtbar wäre ein Weltkrieg in der Zukunft! Furchtbar genug ist aber auch schon das heutige Wettrüsten von nie dagewesenem Ausmaß.

1975 hatten die USA in Form von 30000 Kernwaffen, die im eigenen Lande, auf See, in Europa und in Asien stationiert sind, ein Kernwaffenpotential mit einem

Detonationsäquivalent von 800 Mt TNT (Trinitrotoluol). Dies entspricht der Detonationsstärke von 600000 Hiroshima-Bomben, und das ist das 12fache dessen, was zur Vernichtung der Bevölkerung der ganzen Erde erforderlich wäre. Zur Sicherung des Friedens ist die Sowjetunion gezwungen, ein Kernwaffenpotential von vergleichbarer Größenordnung zu haben.
Allein in den Nachkriegsjahren hat die Erzeugung von Waffen 6 Billionen Dollar gekostet. Das entspricht ungefähr dem Bruttosozialprodukt aller Länder der Erde im Jahre 1975! Der Leser möge sich selbst vorstellen, was für diese Mittel alles hätte geschaffen werden können.
Weil Sozialismus und Frieden untrennbar sind, ist eine der Hauptrichtungen der Außenpolitik der Sowjetunion der Kampf für die Einstellung des Wettrüstens und für Abrüstung. Bereits der XXIV. Parteitag der KPdSU nahm ein Programm konkreter Maßnahmen an, die aktiv zu einer grundlegenden Verbesserung des politischen Klimas in der Welt beitragen, die internationalen Beziehungen im Interesse der Herbeiführung eines dauerhaften und gerechten Friedens auf der Erde umgestalten und letzten Endes den Krieg vollständig aus dem Leben der menschlichen Gesellschaft verbannen sollen. Auf dem XXV. Parteitag wurde dieses Friedensprogramm durch eine Reihe neuer Vorschläge fortgesetzt und weiterentwickelt. Große Bedeutung kommt dem Beschluß zu, einen weltweiten Vertrag über Gewaltverzicht in den internationalen Beziehungen anzustreben.
Auf der Plenartagung des Zentralkomitees der Kommunistischen Partei der Sowjetunion im Oktober 1976 sagte *Leonid Breshnew*: »Wir haben keinen größeren Wunsch, als die Mittel, die gegenwärtig notgedrungen der Volkswirtschaft entzogen werden, zur Hebung des Lebensniveaus der Werktätigen und für die Ziele des Aufbaus einzusetzen. Wir sind bereit, schon morgen Maßnahmen zur Abrüstung einzuleiten – ob es sich um große, radikale oder für den Anfang wenigstens um Teilmaßnahmen handelt – auf wirklich gerechter Grundlage der Gegenseitigkeit. An uns soll es nicht liegen!«

Kernexplosionen zu friedlichen Zwecken

Die Beschreibung der Bombe hat uns eine Vorstellung vermittelt, welche gewaltigen Energiemengen bei einer Kernexplosion innerhalb weniger Mikrosekunden freigesetzt werden. Warum sollte es nicht möglich sein, mit diesen entfesselten Kräften Kanäle durch Gebirgsmassive zu sprengen, Erdwälle aufzuschütten oder Rohstofflager rationeller auszubeuten? Erinnern wir uns an das Dynamit. Es hatte nicht nur die Vernichtungskraft der Kriegstechnik wesentlich erhöht, sondern konnte auch nutzbringend als Sprengstoff im Bergbau und für Erdbewegungsarbeiten eingesetzt werden.
Das ist natürlich keine neue Idee. Parallel zur Entwicklung der Bombe sind hauptsächlich in der Sowjetunion und den USA seit Jahrzehnten Studien zur nutzbringenden Anwendung von Kernexplosionen durchgeführt worden. Aufwendige Forschungsprogramme mit Versuchsexplosionen brachten den Nachweis dafür, daß die Kernexplosionen mit wirtschaftlichem Nutzen für bestimmte großtechnische Projekte einsetzbar sind.

Vertrag über unterirdische Versuche

Um alle politischen Probleme in diesem Zusammenhang zu klären, hatten die Sowjetunion und die USA im Oktober 1974 Verhandlungen begonnen. Diese Besprechungen waren im Vertrag über die Einschränkung der unterirdischen Kernwaffenversuche vorgesehen. Ende Mai 1976 kam man zu einer gegenseitigen Übereinkunft, und die Repräsentanten beider Länder unterzeichneten den Vertrag über unterirdische Kernexplosionen zu friedlichen Zwecken.
In diesem Vertrag verpflichtet sich jede der Seiten, nicht teilzunehmen und nicht zu helfen bei der Herbeiführung einer beliebigen einzelnen Explosion mit einer Sprengkraft von mehr als 150 kt; einer beliebigen Gruppenexplosion mit einer Gesamtstärke von mehr als 150 kt; einer beliebigen Explosion, die nicht zu fried-

lichen Zwecken vorgenommen wird; einer beliebigen Explosion, die nicht den Bestimmungen des Vertrages über das Verbot der Kernwaffenversuche in der Atmosphäre, im kosmischen Raum und unter Wasser, des Vertrages über die Nichtweiterverbreitung von Kernwaffen und anderer internationaler Abkommen entspricht, deren Teilnehmer diese Seite ist.

Kontrollen

Die Frage der Auslösung einer beliebigen einzelnen Explosion mit einer Sprengkraft bis zu 150 kt TNT-Äquivalent wurde noch aufgeschoben. Die Sowjetunion und die USA vereinbarten außerdem, ihre nationalen technischen Kontrollmittel zur Überprüfung der Vereinbarungen in einer Weise zu nutzen, die den allgemeingültigen Prinzipien des Völkerrechts entspricht. Jede Seite verpflichtet sich, diese Kontrollmittel nicht zu stören. Es wurde weiter festgelegt, einander Informationen zur Verfügung zu stellen und dem Vertragspartner Zugang zu den Explosionsorten zu gewähren.

Rechte der Partner

In einem Artikel werden die Rechte der beiden Seiten zur Durchführung von Kernwaffentests unter der Erde, die unter der angegebenen Verbotsgrenze liegen, aufgeführt. Sie besagen, daß jede Seite Explosionen an jedem beliebigen Ort vornehmen kann, der unter ihrer Jurisdiktion oder Kontrolle steht. Beide dürfen Explosionen auf dem Territorium eines anderen Staates auf dessen Bitte hin vornehmen bzw. ihm dabei helfen.

Eine ständige Kommission soll die Verwirklichung der Ziele und Bestimmungen des Vertrages fördern und unverzüglich alle Situationen prüfen, die für unklar gehalten werden können. In dem Vertrag, der zunächst fünf Jahre Gültigkeit behält, ist ausdrücklich festgehalten, daß jede der Seiten keinerlei Kernexplosionen auf dem Gebiet eines anderen Staates durchführen darf, wenn dieser nicht einverstanden ist.

Regelung der Vernunft

Damit wurde eine Regelung der Vernunft gefunden, die der friedlichen Nutzung der Kernenergie neue Perspektiven und ein weites Betätigungsfeld eröffnet. Die Verwirklichung des Abkommens kann wesentlich dazu beitragen, die Vision vom todbringenden Atompilz durch eine neue Vorstellung zu ersetzen: die Vorstellung von einem nützlichen Energieriesen.

Sprengwirkung nach Maß

Energie in drei Formen

Bei nuklearen Explosionen sind 50···60% der gesamten freigesetzten Energie als kinetische Energie in der Druckwelle enthalten, während auf die Hitzestrahlung 30···35% und auf den Neutronenfluß sowie die radioaktive Strahlung 10···15% der Gesamtenergie entfallen. Jede der drei Energieformen ist auch für friedliche Anwendungen interessant: Mit der kinetischen Energie können große Erdmassen bewegt werden, die Wärme könnte man in elektrische Energie umsetzen, und der außerordentlich hohe Neutronenfluß, der am Explosionsort entsteht, ermöglicht vielfältige und aufschlußreiche wissenschaftliche Experimente.

Wir stehen hier am Anfang einer Entwicklung, deren Verlauf heute noch nicht völlig abzusehen ist. Insbesondere sind noch zahlreiche technische Probleme und die Fragen der Verhinderung der Ausbreitung der radioaktiven Spaltprodukte zu lösen.

Einige technische Aufgaben sind jedoch schon weitgehend bearbeitet und gut überschaubar. Beispielsweise die Anpassung der Sprengkraft der Kernexplosion an die erwünschte mechanische Wirkung. Die Erfahrungen von Bombentests waren in dieser Hinsicht nur bedingt geeignet, da dabei nicht so hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Dosierung erforderlich sind. Wird aber bei der Sprengung eines Durchgangs in einen Felsen die Explosionswirkung zu gering bemessen, bleibt das Ziel unerreicht, und eine zu große Sprengkraft kann die Umgebung des Tatortes katastrophal verwüsten.

Hinsichtlich der Anpassung der Sprengwirkung an den Verwendungszweck

müssen wir uns von der Vorstellung lösen, daß nukleare Sprengsätze nur mit riesigen Explosionsstärken hergestellt werden können, die weit über der Wirkung von Sprengladungen mit chemischen Explosivstoffen liegen. Es sind Kernexplosionen bekannt, bei denen die freigesetzte Energie einem Äquivalent von rund 100 kg TNT entsprach. Die größten Sprengbomben im zweiten Weltkrieg hatten jedoch eine Masse von 10000 kg. Von sowjetischen Ingenieuren sind bei Erdbauarbeiten sogar chemische Sprengsätze von 9200000 kg TNT eingesetzt worden, um Erfahrungen über die Auswirkung sehr starker Detonationen zu sammeln.

Radioaktive Spaltprodukte

Eine Testexplosion, mit der Sprengungen für Kanalbauten vorbereitet werden sollten, wurde einmal so karikiert: »Friedliche Kernexplosion gelungen, Gelände für 100 Jahre gesperrt!« Man muß dem Autor dieser Schlagzeile zugestehen, daß er mit der Übertreibung tatsächlich ein Grundproblem getroffen hat, das bei der friedlichen Anwendung von Kernexplosionen gelöst werden muß.
Es nützt nichts, wenn man sehr billig und völlig nach Plan gesprengt hat, dann aber wegen der radioaktiven Verseuchung für lange Zeit den Bauplatz nicht betreten kann. Deshalb ist man bestrebt, bei einer Sprengung so wenig wie möglich radioaktive Spaltprodukte zu erzeugen. Außerdem wählt man nach Möglichkeit den Ort der Kernexplosion so, daß die bei der Kernspaltung des Urans oder Plutoniums unvermeidlich erzeugten radioaktiven Stoffe weitgehend unter der Erdoberfläche gebunden werden.
Bei der Kernfusion von Wasserstoff entsteht, wie wir wissen, als Endprodukt Helium, das nicht radioaktiv ist. Damit würde sich die Wasserstoffbombe – zumindest vom Standpunkt der Verseuchung – besser für friedliche Anwendungen eignen als die Kernspaltungsbombe.

Sauberkeit ist relativ

Die Wasserstoffbombe benötigt jedoch als »Zünder« ebenfalls eine Bombe aus Spaltmaterial, mit der die hohen Temperaturen erzeugt werden, die zur Auslösung des Fusionsprozesses notwendig sind. Somit entstehen also auch bei der Explosion einer Wasserstoffbombe radioaktive Spaltprodukte. Da aber die Sprengwirkung hauptsächlich auf dem Fusionsprozeß beruht, ist die radioaktive Verseuchung bei gleicher Explosionsstärke wesentlich geringer als bei einer reinen Kernspaltungsbombe. Man versucht deshalb, mit möglichst kleinen »Zünderbomben« in den Fusionsbomben auszukommen. Im Rahmen dieser Bestrebungen sind schon Kernexplosionen durchgeführt worden, bei denen nur noch 5% der radioaktiven Substanzen entstanden, die sonst als Folge einer reinen Kernspaltungsbombe mit gleicher Sprengenergie auftraten.
Allerdings bilden sich durch die starke Neutronenstrahlung am Explosionsherd auch bei einer reinen Fusionsexplosion radioaktive Elemente. Diese neutroneninduzierte Radioaktivität ist aber im allgemeinen gering und auf einen engen Bereich begrenzt.

Sprengungen an der Erdoberfläche

In dem genannten Vertrag geht es bisher einzig und allein um unterirdische Kernexplosionen. Offen bleiben weiterhin Probleme von Sprengungen an der Erdoberfläche, bei denen unvermeidlich radioaktive Spaltprodukte in die Atmosphäre gelangen. Solchen Anwendungen kann sicher nur zugestimmt werden, wenn die Menge der entstehenden radioaktiven Stoffe sehr begrenzt ist. Außerdem müßte der Zeitpunkt der Explosion so festgelegt werden, daß nicht durch ungünstige Wetterbedingungen eine radioaktive Wolke in bewohnte oder landwirtschaftlich genutzte Gebiete hineingetragen wird.

Projekte für die Zukunft

Es sind hochinteressante Projektstudien zur friedlichen Nutzung von Kernexplosionen erarbeitet worden, die ökonomisch sehr günstige Anwendungen von Nuklearsprengsätzen versprechen. Testexplosionen erbrachten wertvolle experimentelle Ergebnisse. Dabei wurden aber auch technische Probleme und Schwierigkeiten sichtbar – die Kardinalfrage ist die Einschränkung der radioaktiven Verseuchung –, deren Lösung weitere langjährige und konzentrierte Forschungsarbeit erfordert.

Nutzen und Risiko

Bei der Einführung einer neuen Technik müssen in jedem Fall Nutzen und Risiko einander gegenübergestellt werden. Eine neue Technik wird sich nur dann durchsetzen können, wenn sie bei einem akzeptierbaren Risiko einen wesentlichen Beitrag zur Lösung der gegenwärtigen und zukünftigen Probleme leisten kann.

Betrachten wir unter diesem Blickwinkel einmal einige ausgewählte Projekte, die in der internationalen Fachwelt diskutiert und als aussichtsreich angesehen werden.

Bei unterirdischen Explosionen von Kernsprengladungen ist es naturgemäß wesentlich einfacher als bei Explosionen an der Erdoberfläche, die Ausbreitung der radioaktiven Spaltprodukte unter Kontrolle zu haben. Infolgedessen ist die Entwicklung der Anwendungen unter der Erde am weitesten fortgeschritten.

Untergrundspeicher

Insbesondere stellt die Errichtung von Untergrundspeichern mit Hilfe von Kernexplosionen heute kein größeres Problem mehr dar. Seit vielen Jahren arbeiten sowjetische Ingenieure auf diesem Gebiet und entwickelten Verfahren zur Schaffung von größeren Hohlräumen für verschiedene geologische Gegebenheiten. Das sind: wenig durchlässige Felsen, ausgediente Bergwerksstollen und Salzformationen in Felsen. Die Methode ist soweit gediehen, daß mittels Formeln, unter Berücksichtigung der Festigkeit der Felsen, die mechanische Wirkung der Explosion ausreichend genau vorausberechnet werden kann. Durch ingenieurtechnische Verfahren werden die entstandenen Kavernen gesichert und ausgebaut, damit sie als unterirdische Speicher für unterschiedliche Zwecke verwendet werden können. Beispielsweise wurde mit hohem ökonomischen Nutzen ein Flüssiggasspeicher mit 50000 m³ Fassungsvermögen in einer Salzformation errichtet.

Da über 70% der Erdoberfläche durch Wasser bedeckt sind, erscheint es ganz natürlich, die Vor- und Nachteile von Anwendungen der friedlichen Kernexplosionen unterhalb des Meeresgrundes zu untersuchen. Aus der Vielzahl der entwickelten Pläne erscheint besonders der Bau von Pumpspeicherwerken interessant, deren unteres Reservoir unter dem Meeresboden liegen würde.

Erdölgewinnung

Obwohl die Erdölversorgung für die heutige Generation insgesamt als gesichert erscheint, wird vielerorts die Erschließung und Nutzung von Erdöllagerstätten vorbereitet, die mit den heute üblichen Fördermethoden nicht abbaufähig oder abbauwürdig sind. In solchen Lagerstätten, deren Nutzung die Ölreserven der Welt vervielfachen würden, ist Öl als Ölschiefer oder Teersand vorhanden.

Die große Wärmeentwicklung bei Kernexplosionen wird genutzt, um aus dem Teersand das Erdöl dünnflüssig auszuscheiden. In dieser Form sickert es durch den Sand, sammelt sich in Hohlräumen und wird mit Hilfe gewöhnlicher Fördermethoden herausgepumpt.

Etwas anderer Art sind die Schwierigkeiten, wenn man Erdöl aus Ölschieferlagern gewinnen will. Hier ist das Erdöl in Form von festen organischen Verbindungen in undurchlässiges Gestein eingeschlossen. Außer der Wärmezufuhr zur Verflüssigung der organischen Substanzen ist hier die Sprengwirkung der Kernexplosion unbedingt erforderlich, um das Gestein zu zertrümmern und durchlässig zu machen.

Lockerungssprengungen

Ähnliche Wirkungen erreicht man mit den sogenannten Lockerungssprengungen

auch in Erdgasfeldern und besonders beim Erschließen von Erzvorkommen. Durch die Kernexplosion werden größere Felsmassen derart in kleine Bruchstücke zertrümmert, daß die Förderung des erzhaltigen Gesteins dadurch erheblich vereinfacht wird. Mit geringerer Wirkung sind solche Sprengungen, unter Verwendung konventioneller Mittel, im Erzbergbau als Blockabbau bekannt. Erfolgt die Kernexplosion einige Jahre vor dem Beginn der Förderung, ist in der Zwischenzeit die unvermeidliche Radioaktivität auf geringe Restwerte abgeklungen.

Kernexplosionen als Dienstleistung

Entsprechend dem Vertrag über die Nichtweiterverbreitung von Kernwaffen übernehmen die Signatarmächte, die über Kernwaffen verfügen, die Verpflichtung, diejenigen Vertragsstaaten in den Genuß potentieller Vorteile der friedlichen Anwendung von Kernexplosionen kommen zu lassen, die keine Kernwaffen besitzen. Im Rahmen der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEA) wurde bereits eine umfangreiche Arbeit geleistet, um organisatorische und technische Schriftstücke fertigzustellen, in denen festgelegt ist, unter welchen Bedingungen friedliche Kernexplosionen als Dienstleistung durchgeführt werden und wie sie international überwacht werden sollen.

Die damit verbundenen wissenschaftlich-technischen, wirtschaftlichen, ökologischen und völkerrechtlichen Probleme werden weiterhin bearbeitet. Diese Forschungen müssen eine wissenschaftlich begründete Antwort auf die Frage geben, welchen realen Nutzen heute und in der Zukunft die Anwendung von Kernexplosionen für friedliche Zwecke bringen kann.



Kerntechnische Forschungen in Rossendorf

Beginn der Entwicklung in der DDR

Erster Kernreaktor in der DDR

Am 14. Dezember 1957 wurde der letzte Schritt zum Aufbau des ersten Forschungsreaktors der Deutschen Demokratischen Republik im Zentralinstitut für Kernforschung (ZfK) in Rossendorf bei Dresden getan. Die wesentlichsten Baugruppen dieses Reaktors waren auf Grund eines Regierungsabkommens von der Sowjetunion an die DDR geliefert worden.

Mit schwer zu beschreibender Spannung und innerer Erregung verfolgte eine kleine Gruppe von Physikern und Ingenieuren, wie der Neutronenstrom einer in die aktive Zone eingebrachten Neutronenquelle durch den Vorgang der Uranspaltung in immer zunehmendem Maß verstärkt wurde, bis er schließlich, scheinbar unaufhaltsam, auch nach Entfernung der Neutronenquelle weiter anstieg. Dieser Effekt war der eindeutige experimentelle Beweis der selbständig ablaufenden Kettenreaktion der Kernspaltung.

Die Sowjetunion lieferte außerdem ein Festfrequenzzyklotron vom Typ U-120. Nach Beendigung der Bau-, Montage- und Justierarbeiten wurden am 24. April 1958 mit dieser Anlage erstmals Ionen beschleunigt. Die experimentelle kernphysikalische Forschung stützte sich anfangs vorwiegend auf diesen Beschleuniger. Sie hat das Ziel, grundlegende Beiträge zur Aufklärung der Struktur des Atomkerns und der Natur der Kernkräfte zu liefern.

Entwicklung der Kerntechnik

Mit der Inbetriebnahme der beiden großen Anlagen wurde, dank der Hilfe der UdSSR, der DDR die Möglichkeit eröffnet, sich einen geachteten Platz in der Reihe der in der Kernforschung und Kerntechnik tätigen Staaten zu erringen. »Start und Beginn waren besonders mühevoll und schwierig; denn in der DDR mußte ein Zweig der modernsten Wissenschaft, die Kernforschung und Kerntechnik, nach einer Zwangspause für Deutschland von über einem Jahrzehnt neu aufgegriffen werden. Die Kernforschung war inzwischen im internationalen Maßstab außerordentlich erfolgreich gewesen und hatte bereits grundlegende Bedeutung für den weiteren wissenschaftlichen und technischen Fortschritt erlangt«, führte *H. Klare* anläßlich des 10. Jahrestages des ZfK aus.

Programm der Akademie

Heute kann festgestellt werden, daß sich das ZfK – seit 1963 im Rahmen der Forschungsgemeinschaft der naturwissenschaftlichen, technischen und medizinischen Institute der Akademie der Wissenschaften der DDR – zu einer der größten komplexen Forschungsstätten unseres Landes entwickelt hat.

Im Jahre 1700 hatte *Gottfried Wilhelm Leibniz* in seiner Gründungsschrift für eine »Societät der Wissenschaften« die Vereinigung von Theorie und Praxis als wichtigstes Anliegen dieser Gelehrtengesellschaft formuliert. »Bloßer Kuriosität oder Wissensbegierde und unfruchtbaren Experimenten« setzte er die Forderung entgegen, nicht allein »die Künste und die Wissenschaften, sondern auch Land und Leute, Feldbau, Manufakturen und Kommerzien und mit einem Wort die Nahrungsmittel zu verbessern«. Diese von Leibniz erhobene Forderung ist heute oberstes Prinzip der Akademieforschung.
Auch die kerntechnische Forschung wird in enger Verbindung mit der Praxis betrieben. In den Anfangsjahren mußten selbstverständlich erst die grundlegenden physikalischen und technischen Methoden entwickelt werden. Die Arbeiten waren im wesentlichen mit Untersuchungen am Rossendorfer Forschungsreaktor (RFR) verbunden, dessen Routinebetrieb mit der projektierten Leistung von 2000 kW im November 1958 aufgenommen wurde.

Rossendorfer Forschungsreaktor

Der Rossendorfer Forschungsreaktor (RFR) ist ein Wasser-Wasser-Reaktor, bei dem normales Wasser gleichzeitig als Moderator und als Kühlmittel dient (Bild 133). Erinnern wir uns, daß in derartigen Systemen unbedingt angereichertes Uran eingesetzt werden muß. Im Falle des RFR haben die mit Aluminium umhüllten Brennstoffstäbe einen auf 10% erhöhten Anteil an Uran 235 (Bild 134). Die Stäbe sind in der aktiven Zone gitterförmig angeordnet.

Neutronencharakteristik

Die neutronenphysikalische Charakteristik der Spaltzone drückt sich in einer Neutronenbilanz aus, die sich sehr stark von der in den ersten Uran-Graphit-Reaktoren mit natürlichem Uran unterscheidet:

	Uran-Graphit-Reaktor	RFR
Ausbeute je verbrauchtem U-235-Kern	2,10	2,090
Einfang im U 235	1,00	1,000
Einfang im U 238	0,85	0,083
Einfang in Moderator und Kühlmittel	0,12	0,268
Verlust nach außen	0,05	0,685
Reserve	0,08	0,054

Es ist ersichtlich, daß die Zahl der entstehenden Spaltneutronen, bezogen auf ein im Uran 235 absorbiertes Neutron, in beiden Fällen wegen der unbedeutenden Zunahme durch Spaltungen im Uran 238 nur wenig verschieden ist. Außer dem einen Neutron, das für die Fortsetzung der Kettenreaktion notwendig ist, bleiben in beiden Fällen noch rund 1,1 Neutronen zur Deckung der verschiedenen Verlustanteile übrig.

Vergleich mit Graphitreaktor

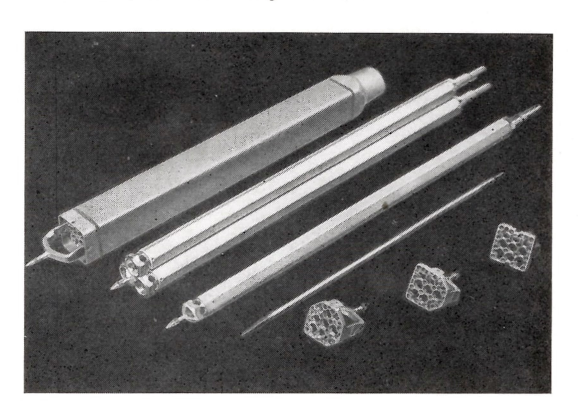
Der überwiegende Teil der Verluste beim Uran-Graphit-Reaktor ist durch den Einfang im Uran 238 bedingt, der zur Erzeugung von Plutonium führt. Dieser Effekt ist beim RFR etwa 10mal kleiner, dagegen machen die herausfliegenden Neutronen einen erheblichen Anteil aus. Durch diesen Unterschied ist es bedingt, daß die kritische Spaltzone eines Uran-Graphit-Reaktors einen Durchmesser von etwa 6 m und mehr haben muß, während beim RFR ein Zylinder von etwa 50 cm Höhe und etwa 50 cm Durchmesser ausreicht.

Reaktor liefert Neutronen

Die unterschiedlichen Bilanzen sind sowohl durch die Anreicherung des Urans, die zu einer wesentlichen Verminderung des Einfangs im Uran 238 führt, als auch durch die Eigenschaften des Wassers als Bremsmittel bedingt. Das wichtigste Ergebnis des Vergleichs ist der große Anteil von Neutronen, die aus der

133 Blick auf den Rossendorfer Forschungsreaktor mit der Entlademaschine für Bestrahlungsproben

134 Verschiedene Ausführungsformen der Brennstoffstäbe und Kassetten des Rossendorfer Forschungsreaktors

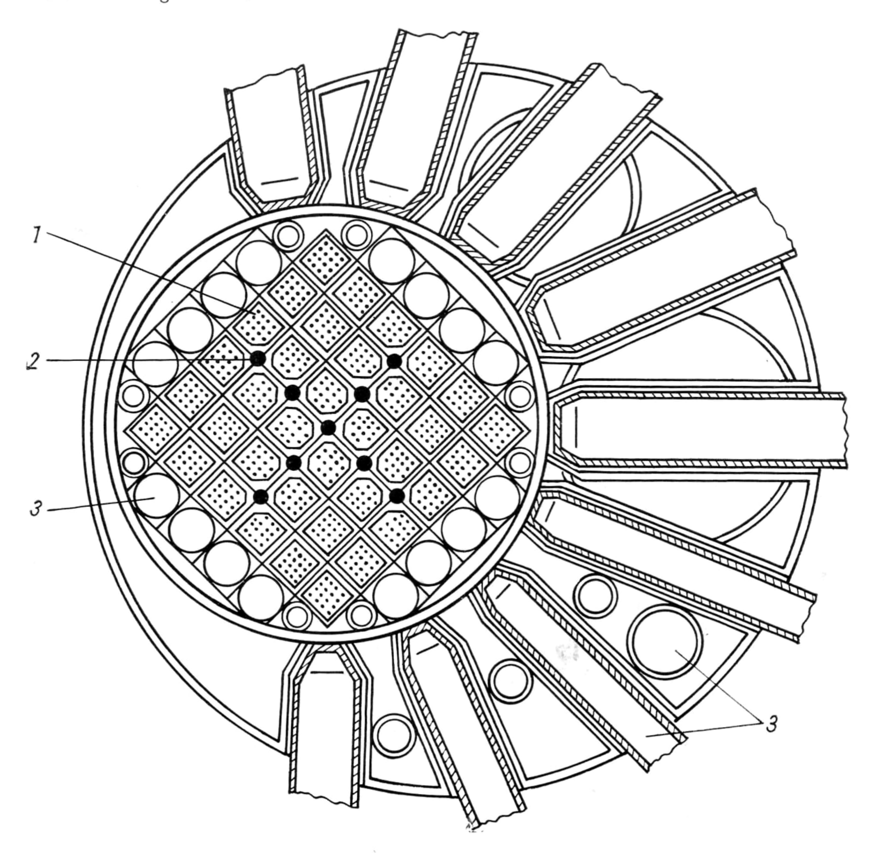


Oberfläche des RFR austreten. Diese Neutronen werden einerseits bei physikalischen Untersuchungen, andererseits zur Herstellung von radioaktiven Isotopen ausgenutzt. Durch diese Eigenschaften ist der RFR als ein typischer Forschungsreaktor charakterisiert.
Die Konstruktion des Reaktors ist den Verwendungszwecken entsprechend angepaßt. Es gibt 10 horizontale Kanäle, durch die Neutronen ohne Hindernisse in den Außenraum gelangen und für Experimente oder Bestrahlungen genutzt werden können. Im Horizontalschnitt der Spaltzone (Bild 135) erkennt man an ihrem Rand weitere vertikale Bestrahlungskanäle. Mit der auf dem Reaktorkopf angeordneten Be- und Entladevorrichtung ist es möglich, Bestrahlungsproben in allen Positionen der Spaltzone und ihrer Umgebung zu erreichen, ohne die oberen Abschirmplatten abheben zu müssen.

Hoher Neutronenfluß erwünscht

Ganz allgemein ist es bei Forschungsreaktoren erwünscht, einen hohen Wert des Neutronenflusses bei möglichst geringer Wärmeleistung zu erzielen. Es liegt in der Natur der Vorgänge, daß das Ziel nur erreicht werden kann, wenn durch eine günstige Anordnung möglichst wenig Spaltmaterial für die kritische Masse erforderlich ist. Im Falle des RFR ist die Mindestmenge etwa 4 kg Uran 235. Mit weniger Spaltstoff würde der Reaktor nicht mehr kritisch werden. Für eine Steigerung der Neutronenflußdichte muß man deshalb höhere Wärmeleistungen in Kauf nehmen, da Neutronenfluß und Wärmeleistung direkt proportional sind. In diesem Sinne ist am RFR eine Leistungserhöhung von 2000 auf 10000 kW auf der Grundlage veränderter Brennelemente durchgeführt worden.

135 Horizontalschnitt durch die aktive Zone des Rossendorfer Forschungsreaktors
1 *Kassetten mit Uranstäben;* 2 *Kanäle für Regelungs- und Sicherheitsstäbe;* 3 *Bestrahlungskanäle*





Der auf dem Bild 133 zu erkennende Gesamtblock des Reaktors mit einem Durchmesser von etwa 7 m und einer Höhe von rund 6 m hat einen 2,5 m starken Außenmantel aus Schwerstbeton zur Abschirmung der radioaktiven Strahlung aus dem Innern. Im Zentrum befindet sich die aktive Zone etwas oberhalb des Hallenfußbodens in einem zylindrischen Aluminiumbehälter von 0,6 m Durchmesser und 1,7 m Höhe. Normales Wasser durchfließt die Spaltzone von oben nach unten – bei Höchstleistung des Reaktors etwa 1000 m³/h – und kühlt die Brennelemente. Der innere, auch Separator genannte Tank ist von zwei weiteren zylindrischen Behältern, Reflektor- und Schutztank, umgeben.

Konstruktion des RFR

Der hohe Wasserdurchfluß mit Geschwindigkeiten bis zu 5 m/s bewirkt, daß die Temperatur der Brennelementoberflächen Werte von 100 °C nicht übersteigt. Nachteilig ist dabei das dadurch bedingte niedrige Temperaturniveau des Kühlwassers, etwa 50 °C, das nicht für eine Nutzung ausreicht. Deshalb muß die Wärme aus dem Reaktor vermittels zweier durch Wärmetauscher verbundener Wasserkreisläufe über einen Kühlturm an die Umgebung abgegeben werden.

Kühlung der Spaltzone

Der RFR wird einmal im Jahr gründlich durchgesehen. Im Laufe der Jahre wurden dabei vorwiegend an mechanischen Bauteilen kleinere Schäden aufgedeckt und sofort behoben. Insgesamt kann festgestellt werden, daß der RFR während seiner bisherigen Betriebszeit eine sehr hohe Verfügbarkeit erreichte.

Radioaktive Isotope

Der Rossendorfer Forschungsreaktor wird mehrschichtig genutzt, um den zunehmend wachsenden Bedarf an Bestrahlungskapazität, insbesondere zur Herstellung radioaktiver Isotope, befriedigen zu können.

Das Produktionssortiment des ZfK an radioaktiven Isotopen hat sich ständig entwickelt. Der Katalog umfaßt mehr als 500 Erzeugnisse mit 60 verschiedenen Radionukliden. Den Hauptteil machen dabei die Nuklearpharmaka aus.

Reiches Sortiment

1976 wurden neue größere Anlagen zur Bearbeitung der im Reaktor bestrahlten Stoffe in Betrieb genommen. Für die Handhabung radioaktiver Proben und die Präparation der radioaktiv markierten Erzeugnisse stehen in strahlensicheren speziellen Zellen eine Vielzahl von Standardgeräten und Manipulatoren zur Verfügung (Bild 136). Um Kobalt-60-Präparate herzustellen, sind in den Zellen besondere Vorrichtungen zum Schneiden, Schweißen und Verpacken erforderlich. Bei schwächeren Aktivitäten kommt man mit geringerer Abschirmung aus und hat dafür bessere Beobachtungsmöglichkeiten.

Verarbeitung in »heißen Zellen«

Seit 1958 wurden insgesamt über 100000 Sendungen ausgeliefert, davon über 60% für den Export. Es wird eine Steigerung der Produktionsrate auf über 15000 Präparate je Jahr erwartet.

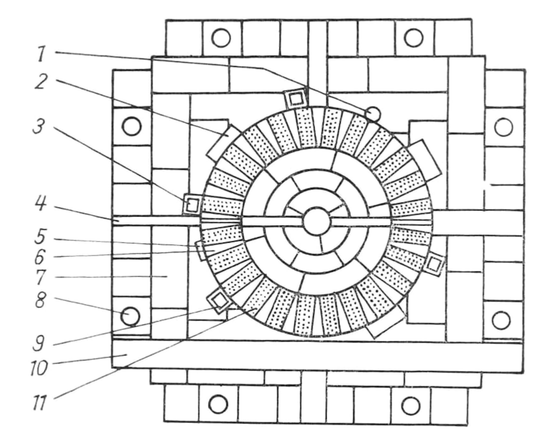
Rossendorfer Ringzonenreaktor

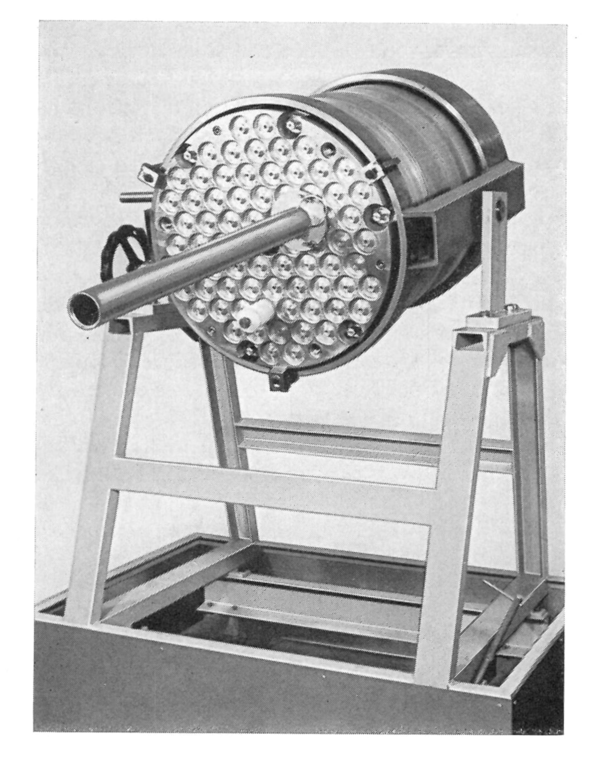
In wachsendem Maße mußten reaktorphysikalische Methoden für die Ermittlung der Betriebsparameter und die sichere Betriebsführung von Reaktoren größerer Leistung entwickelt werden. Die Inbetriebnahme derartiger Leistungsreaktoren ist ein wesentlicher Bestandteil des langfristigen Energieprogramms der DDR. Für die vorbereitenden Untersuchungen reicht schon ein Reaktor mit geringer Leistung – ein sogenannter Nulleistungsreaktor – aus, dessen Spaltzone für unterschiedliche Zwecke umgestaltet werden kann. Das war beim RFR nur sehr

Training für die Praxis

136 Strahlengeschützte Verarbeitung radioaktiver Isotope mit Manipulatoren in »heißen Zellen«

137 Horizontalschnitt durch den Rossendorfer Ringzonenreaktor
1 Neutronenquelle; 2 Sicherheitseinheit; 3 Regeleinheit; 4 Experimentierkanal; 5 Überlauf; 6 Graphitkeil; 7 Graphitreflektor; 8 Detektorkanal; 9 Regeleinheit; 10 Tangentialkanal; 11 Brennstoffkassette





138 Stahlzylinder mit Kernbrennstoff, der als schnelles Einsatzgitter für den Rossendorfer Ringzonenreaktor vorbereitet wird

bedingt möglich, der außerdem, wie schon erwähnt, zunehmend für Bestrahlungszwecke benötigt wurde.

Reaktor für Experimente

Im Jahre 1960 begannen aus diesem Grunde die Wissenschaftler und Techniker des ZfK Rossendorf die Konstruktionsarbeiten zu einem neuen Reaktor. Er wurde am 16. Dezember 1962 erstmals kritisch und erhielt auf Grund seiner Bauweise den Namen Rossendorfer Ringzonenreaktor (RRR).

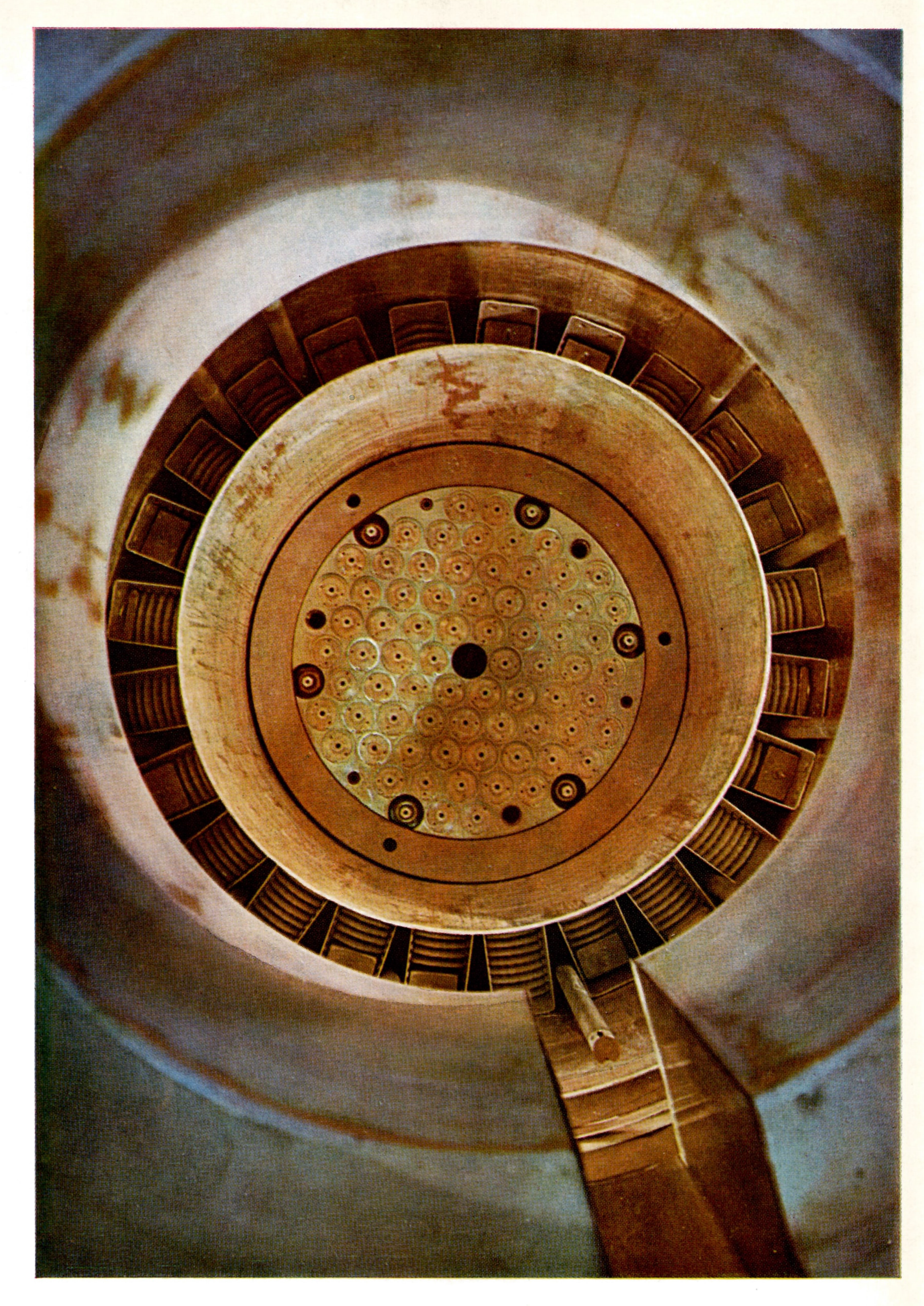
Die Spaltzone hat die Form eines zylindrischen Ringes von etwa 90 cm Außen- sowie 60 cm Innendurchmesser und 60 cm Höhe. Mit Wasser als Moderator in der aktiven Zone und z. B. Graphit im Zentrum sind zum Erreichen des kritischen Zustandes reichlich 1700 stabförmige Brennelemente – zu Sektionen und Kassetten zusammengefaßt – erforderlich. Die kritische Masse beträgt, bei 20% angereichertem Uran, annähernd 9 Kilogramm Uran 235. Die Lücken zwischen den Brennstoffkassetten sind mit Graphitkeilen ausgefüllt. Aus dem gleichen Material sind die Bausteine des äußeren Reflektors gefertigt. Die Steuer- und Abschaltstäbe befinden sich am Außenrand der Ringzone (Bild 137). Die maximale Wärmeleistung des RRR beträgt 10 kW.

An Stelle eines Moderators kann man in den zentralen Innenraum der aktiven Zone des RRR gemischte Anordnungen von Kernbrennstoff und Moderator einsetzen, um die reaktorphysikalischen Eigenschaften von größeren Reaktoren zu simulieren.

Schnelles Einsatzgitter

Es ist sogar möglich, bei geeigneter Auswahl der Materialien, Teile von schnellen Reaktorsystemen nachzubilden. Bild 138 zeigt einen Stahlzylinder,

139 Blick in den Rossendorfer Ringzonenreaktor mit schnellem Einsatzgitter im Zentrum und wassermoderierter thermischer Ringzone



dessen Bohrungen Kernbrennstoff enthalten und der für den Einsatz im Reaktor vorbereitet ist (Bild 139).
Die sogenannten schnellen Einsatzgitter sind für sich allein unterkritisch und bilden nur zusammen mit der thermischen Ringzone und einer zwischen beiden befindlichen Pufferzone aus metallischem Uran ein kritisches System. Trotzdem ist es möglich, an diesen Anordnungen Forschungsarbeiten zu betreiben, die zur Charakterisierung schneller Reaktoren einen wertvollen Beitrag darstellen. Insbesondere können komplizierte Rechenprogramme anhand der experimentellen Ergebnisse überprüft werden. Da diese Untersuchungen, in Anbetracht der großen Zukunftsaussichten dieser Reaktoren, am RRR Vorrang haben, wurde ein weiterer Nulleistungsreaktor errichtet.

RAKE

Es handelt sich um ein einfaches Uran-Wasser-System, das sich durch vielseitige Verwendungsmöglichkeiten auszeichnet und als »Rossendorfer Anordnung für kritische Experimente« (RAKE) bekannt geworden ist. Die RAKE steht ausschließlich für methodische Entwicklungen und Modelluntersuchungen auf dem Gebiet thermischer Reaktoren zur Verfügung.

Neutronen-generatoren

Zur experimentellen Basis der reaktorphysikalischen Forschung gehören außerdem Neutronenimpulsgeneratoren. Das sind kleine Beschleuniger, in denen mittels einer Kernreaktion zwischen Deuterium und Tritium Neutronen erzeugt werden. Die Neutronen werden bei impulsförmiger Steuerung der Produktion zur Untersuchung des Zeitverhaltens als Störung in den Reaktor injiziert. Auf diese Weise kann auch die Reaktivität von stark unterkritischen Anordnungen ermittelt werden, z. B. bei der Inbetriebnahme von Brennstofflagern. Ein anderer Anwendungsbereich ist die zerstörungsfreie Messung des Gehalts an Kernbrennstoff mit Hilfe neutroneninduzierter Spaltungen.

Forschungsaufgaben

Gegenwart und Zukunft der friedlichen Nutzung der Kernenergie gestaltet das Zentralinstitut für Kernforschung Rossendorf durch zahlreiche Forschungsarbeiten mit. Aus der breiten Palette der Untersuchungen zur Reaktorphysik, zu Problemen des Kernbrennstoffs, der Natriumtechnik und der Kernchemie sollen einige Beispiele herausgegriffen werden, die unmittelbar mit den in der DDR betriebenen Kernkraftwerken in Beziehung stehen.

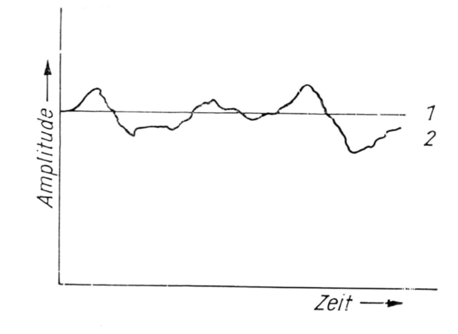
Hilfe für Kraftwerke

Einen wesentlichen Beitrag zur Inbetriebnahme und Betriebsführung der Reaktoren im VEB Kernkraftwerk »Bruno Leuschner« bei Greifswald leisteten die Mitarbeiter des ZfK mit der Entwicklung und dem praktischen Einsatz von neuen Gerätesystemen zur Meßwerterfassung. Sie sind mit Prozeßrechnern gekoppelt und ermöglichen eine sofortige und umfangreiche Registrierung der Betriebsdaten sowie deren Zusammenfassung. Dazu wurden außerdem auf der Grundlage erprobter reaktorphysikalischer Verfahren Rechenprogramme entwickelt und angewandt. Sie gestatten die Ermittlung wichtiger Betriebsparameter, die aus den gemessenen Größen abgeleitet werden können. Ein ähnliches System wurde auch im Kernkraftwerk in Rheinsberg installiert.
Besonders erwähnenswert sind in diesem Zusammenhang Meßverfahren, die eine Bestimmung der Wirksamkeit der Regelstäbe während des Leistungsbetriebes ermöglichen, ohne daß die Energieproduktion des Kraftwerkes dadurch beeinträchtigt wird. Die Methode beruht darauf, daß durch das Bewegen von Regelkassetten kurzzeitige (etwa 10 s) Leistungsschwankungen von wenigen Prozent um den stationären Wert erzeugt werden. Die Antwort des Reaktors auf diese Störung wird mittels Neutronendetektoren verfolgt, im Rechner registriert und ausgewertet.

Rauschdiagnostik

Große Bedeutung für den Betrieb der gegenwärtig genutzten Druckwasserreaktoren hat auch eine im ZfK bearbeitete Methode zum rascheren Erkennen von Störungen im Reaktorbetrieb. Die herkömmliche Meßtechnik zum Über-

140 Statistische Schwankungen eines Signals
1 Mittelwert; 2 Schwankungssignal



wachen des Betriebszustandes beschränkt sich auf die Registrierung der Kurzzeitmittelwerte verschiedener Signale wie Neutronenfluß, Temperatur, Druck u. a. Das reicht aus, um den normalen Betriebsablauf zu gewährleisten. Die statistischen Schwankungen der Signale werden als lästige Beigabe betrachtet und mit Hilfe von Filtern unterdrückt.
In den statistischen Schwankungen der genannten Größen (Bild 140) – auch Reaktorrauschen genannt – stecken jedoch zusätzliche Informationen über den Reaktor. Man geht von der These aus, daß sich alle Betriebsstörungen und Schäden in den Schwankungen der Ausgangssignale abbilden und baut darauf ein Diagnostikverfahren auf.
Mit Hilfe einer geeigneten Auswertung der Rauschanteile und der Kombination verschiedener Signale macht man sich daran, die Störquellen zu ermitteln. Bei der Vielzahl der möglichen Rauschquellen kommt es dabei sehr auf die Kenntnis aller in Frage kommenden Vorgänge im System an. Dann müssen Modellvorstellungen bezüglich des Entstehungsmechanismus der Schäden entwickelt und die Prozesse ermittelt werden, welche die Schäden auslösen. Ist dieser Schritt gelungen, kann man die speziellen Prozesse mit Hilfe der Rauschdiagnostik überwachen und so die Störungen in ihrer Entstehungsphase entdecken, ehe größerer Schaden eintritt.
Die Entscheidung darüber, wie weit sich Abweichungen vom Normalbetrieb entwickeln dürfen, ehe unmittelbar eingegriffen werden muß, liegt selbstverständlich beim Reaktorkonstrukteur und Technologen, der die Belastungsgrenzen aller Bauteile genau kennt.
Die Anwendung der Rauschdiagnostik an Kernkraftwerken hat das Ziel, Abweichungen vom Normalzustand, die zu Schäden führen, frühzeitig festzustellen und rechtzeitig Gegenmaßnahmen ergreifen zu können. Damit vermeidet man längere Stillstandszeiten für Reparaturzwecke, was einen bedeutenden ökonomischen Nutzen zur Folge hat. Das Verfahren hat allgemeine Bedeutung und ist auch für viele andere industrielle Prozesse, insbesondere in der Chemiewirtschaft, interessant.

16 Energie der Zukunft

Projekte der Gegenwart

Die Energie hat sich mehr und mehr zu einem entscheidenden Faktor für den Bestand und das Wachstum der Wirtschaft eines jeden Landes entwickelt. Über die Bedeutung der Energie in unserem täglichen Leben haben wir alle sehr konkrete Vorstellungen. Sie wird heute und in der Zukunft von uns in den unterschiedlichsten Formen und für alle Verwendungszwecke benötigt.

Anteil der Kernenergie

Wir haben gesehen, auf welchem Wege es durch die Nutzung der Kernspaltung möglich ist, in den nächsten Jahrzehnten unseren Bedarf an Wärme- und Elektroenergie zu befriedigen. Die zahlreichen Projekte zur Verwendung der Kernenergie zum Antrieb von Schiffen und Raketen sind aber bisher noch nicht erwähnt worden. Obwohl es sehr interessante Ausführungsvarianten gibt, stehen sie im Gesamtrahmen der friedlichen Nutzung der Kernenergie sehr am Rande und sollen deshalb hier nur kurz gestreift werden.

Kernreaktoren auf Schiffen

Bewährt hat sich das in der Sowjetunion realisierte Prinzip des mit Kernkraft angetriebenen Eisbrechers. Die 1960 fertiggestellte »Lenin«, ein 16000-Tonnen-Schiff, muß den Kernbrennstoff nur alle zwei Jahre ersetzen, was für längere Fahrten von großem Vorteil ist (Bild 141). 1975 wurde die doppelt so stark ausgelegte »Arktika« in Dienst gestellt, die erst nach fünf Jahren neu beladen werden muß.

Es gibt auch einige mit Kernenergie angetriebene Handelsschiffe, die jedoch bisher keine wesentliche Rolle spielen. In größerer Stückzahl sind Flugzeugträger und Unterseeboote mit derartigen Antriebssystemen gebaut worden, werden aber ausschließlich für militärische Zwecke eingesetzt. Nähere Einzelheiten darüber sind, sicher aus Geheimhaltungsgründen, nicht bekannt geworden.

Triebwerke mit Kernenergie

Die Erforschung des Weltraums ist untrennbar verbunden mit der Entwicklung leistungsfähiger Raketentriebwerke. Man arbeitet in der Sowjetunion daran, die Aufheizung des Treibgases in den Brennkammern effektiver zu gestalten, als es bisher auf thermochemischem Wege geschieht. Theoretisch wäre es möglich, die Gasteilchen durch die von Kernreaktoren freigesetzte Wärmeenergie aufzuheizen und etwa die doppelte Ausströmgeschwindigkeit zu erreichen. In der Praxis ist man jedoch bisher noch nicht zu brauchbaren Einsatztypen von Kernenergietriebwerken gekommen.

Langfristige Planung

Der erste Kernspaltungsreaktor wurde 1942 kritisch. Heute, über 35 Jahre danach, werden erst wenige Prozent des Energiebedarfs aller Länder der Erde mit Hilfe der Kernenergie befriedigt. Das vermittelt uns einen Eindruck, wie weit im voraus auf dem Gebiet der Energieerzeugung geplant und gearbeitet werden muß. Es ist demnach unumgänglich, die Energietechnologie für das nächste Jahrhundert heute in Angriff zu nehmen.
Die Hoffnung, den wachsenden Bedarf durch Nutzung natürlicher Energiequellen, wie der Sonneneinstrahlung, der Erdwärme oder der Gezeitenströmung, abdecken zu können, wird sich aller Voraussicht nach nur in beschränktem Umfang und sehr stark ortsgebunden erfüllen.

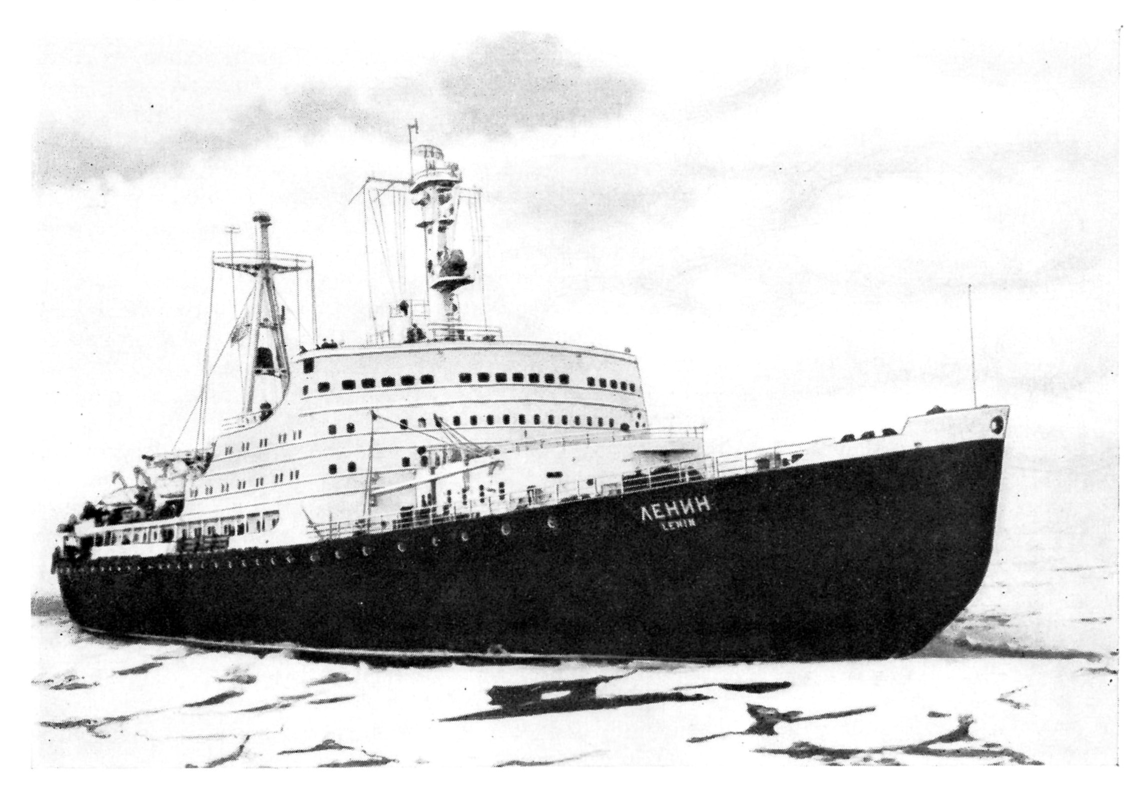
Gesteuerte Kernfusion

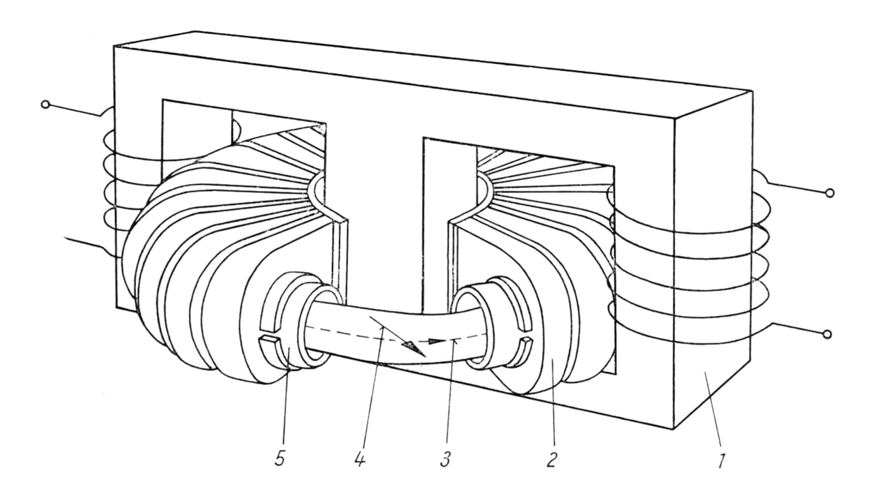
Die größten Aussichten, die Nutzung der Kernspaltungsenergie nach einer Übergangsperiode einmal abzulösen oder zu ergänzen, hat die gesteuerte Kernfusion, d. h. die Verschmelzung leichter Atomkerne. Bisher ist zwar noch kein »kritisches Experiment« der Kernfusion gelungen, doch war schon im Zusammenhang mit der Wasserstoffbombe darauf hingewiesen worden, daß die dafür erforderlichen Bedingungen nur äußerst schwer zu erreichen sind.

Bedingungen für die Fusion

»Die Bedingungen zur Einleitung von Kernverschmelzungen, die man steuern und technisch nutzen kann, sollten sich nach unseren heutigen Kenntnissen am besten in einem außerordentlich hoch erhitzten Gasgemisch aus Deuterium und Tritium bei einer nicht zu kleinen Zahl von Teilchen je Kubikmeter verwirklichen lassen. Es sind Temperaturen zwischen 50 Millionen und 1 Milliarde Kelvin erforderlich. Die Atome von Wasserstoff und Helium sind bei diesen Temperaturen

141 Eisbrecher »Lenin«





142 Ringförmige Plasmaversuchsanlage nach dem TOKAMAK-Prinzip für Untersuchungen zur Kernfusion
1 *Transformator;* 2 *Hauptfeldspule;* 3 *Plasma;* 4 *Magnetfeldlinie;* 5 *Vakuumgefäß*

und bei den technisch möglichen Drücken längst vollständig in die positiv geladenen Atomkerne und in Elektronen zerfallen. Ein solches Gas aus positiven Ionen und freien Elektronen nennt man ein vollständig ionisiertes Plasma. Die Atomkerne bewegen sich in diesem Plasma vollkommen ungeordnet mit sehr großen Geschwindigkeiten durcheinander. Dabei treten Zusammenstöße auf, von denen einige zur Kernverschmelzung führen«, lesen wir im URANIA-Universum 1970.

Man ist bestrebt, die Betriebsbedingungen eines Fusionsreaktors so einzurichten, daß die Zusammenstöße so häufig wie möglich erfolgen, damit insgesamt mehr nutzbare Energie abgegeben werden kann, als zur Aufrechterhaltung des Betriebes aufgewandt werden muß. Das erfordert Mindestwerte der Teilchendichte und der Zeit, in der die Teilchen bei gegebener Temperatur und vorgegebenem Volumen zusammengehalten werden müssen. Diese Problemkreise sind eng miteinander gekoppelt und umfassen zahlreiche schwierige, bisher nicht gelöste physikalische und technologische Fragen.

Energie aus Wasser

Gelingt der Bau von Fusionsreaktoren, wäre damit der Menschheit eine unerschöpfliche Energiequelle erschlossen. Das wird deutlich, wenn wir uns vergegenwärtigen, daß 30 l natürliches Wasser 1 g Deuterium enthalten und bei der Verschmelzung dieser geringen Menge eine Energie von etwa 100000 kWh freigesetzt wird! In Wärmekraftwerken werden zur Erzeugung der gleichen Energiemenge 20 t Braunkohlenbriketts benötigt.

Ein weiterer Vorteil der Fusionsreaktoren besteht darin, daß bei der Kernverschmelzung wesentlich weniger langlebige radioaktive Rückstände gebildet werden als bei einem Kernspaltungsreaktor gleicher Leistung. Sie werden durch die bei der Fusion entstehenden Neutronen im Reaktorgefäß, in der Abschirmung und im Kühlsystem erzeugt.

In den sechziger Jahren gab es zwei wesentliche Fortschritte auf dem Gebiet der Fusionsforschung:

- Bei Temperaturen zwischen 10 und 100 Millionen Kelvin wurden Plasmadichten von $10^{20} \cdots 10^{22}$ Deuteronen je Kubikmeter erreicht.
- Es wurde demonstriert, daß es prinzipiell möglich ist, ein Plasma durch magnetische Felder zusammenzuhalten.

Letzteres ist eine unbedingte Voraussetzung für die Kernfusion, da keinerlei Materialien bekannt sind, die zum Einschluß des heißen Plasmas einer unmittelbaren Berührung standhalten würden.
Anfang der siebziger Jahre erzielten die sowjetischen Wissenschaftler einen entscheidenden Durchbruch, als es ihnen gelang, in einer torusförmigen Versuchsanlage, dem sogenannten TOKAMAK, sehr günstige Plasmaeinschlußbedingungen zu realisieren (Bild 142). Die Arbeiten in allen an dieser Forschung interessierten Ländern konzentrieren sich seither auf diesen Anlagentyp.

Zieldaten

Die Zieldaten, die man erreichen muß, sind für Deuteriumreaktoren Temperaturen von $5 \cdot 10^8 \cdots 10^9$ K, Teilchendichten von $10^{21}/m^3$ und Einschlußzeiten von $5 \cdots 100$ s. Für Deuterium-Tritium-Reaktoren liegt bei gleicher Teilchendichte die Temperatur zwischen 10^8 K und $5 \cdot 10^8$ K und die Einschlußzeit bei $0{,}3 \cdots 30$ s. Zum gegenwärtigen Stand der Forschung läßt sich feststellen, daß bisher die Zehnmillionen-Kelvin-Grenze überschritten wurde und für das Produkt aus Teilchendichte und Einschlußzeit Werte von etwa 10^{18} s/m^3 erreicht worden sind.
Zur Zeit treffen über die Versuchsergebnisse ständig neue Meldungen ein. So gibt es u. a. einige hoffnungsvolle Versuche, mit Lasern die erforderlichen hohen Temperaturen zu erzeugen. Es kann aber heute noch niemand mit Bestimmtheit sagen, wann der erste funktionstüchtige Kernfusionsreaktor aufgebaut sein wird.

Prognose

»In der Wissenschaft pflegt es jedoch so zu sein, daß über einen quälend langen Zeitraum die notwendigen Einzelergebnisse gesammelt werden müssen und dann plötzlich, völlig unerwartet – so könnte man meinen – das letzte Hindernis überwunden wird«, schreibt der sowjetische Physiker *Petrosjanz* und erinnert an eine weise Bemerkung von *Louis Pasteur*: Der Zufall kommt dem vorbereiteten Verstand zu Hilfe. »Ja, eben dem vorbereiteten Verstand, der eine große Menge von Kenntnissen angehäuft hat. Die Überwindung einer schwierigen wissenschaftlichen Barriere in der Physik ist deshalb nichts Unerwartetes, sondern das Resultat der Anhäufung vieler Daten, von denen vielleicht nicht alle ganz richtig, einige vielleicht sogar falsch waren, doch auch diese können den ersehnten Sieg nicht verhindern. Aus diesem Grunde ist es nicht auszuschließen, daß die Lösung dieses größten Problems der modernen Physik unter Umständen schon in den nächsten Jahren gefunden wird.«

17

Erläuterungen kerntechnischer Begriffe

Abbrand Maß für den Brennstoffverbrauch im Kernreaktor im Verhältnis zur anfänglichen Brennstoffbeladung (in %). Häufig wird als Abbrand auch die dem Brennstoff während der Reaktorbetriebszeit entnommene Energie bezeichnet, die dann in Megawatt-Tagen je Tonne bestrahlten Brennstoffs (MWd/t) angegeben wird.
abgereichertes Uran Uran mit einem geringeren Anteil Uran 235 als im natürlichen Uran (etwa 0,72 %).
Abklingbehälter Wasserbehälter, in dem strahlende Materialien so lange lagern, bis ihre Radioaktivität auf einen gewünschten Wert abgenommen hat.
Abschaltreaktivität Um diesen Reaktivitätswert ist beim Abschalten des Reaktors mit den für den Betrieb vorgesehenen Mitteln das System vom kritischen Zustand entfernt.
Abschaltstab Hat die Funktion, durch beschleunigtes Einfahren in das System den Reaktor unmittelbar abschalten zu können.
Abschirmung Schutzeinrichtung an radioaktiven Quellen und kerntechnischen Anlagen, um die Intensität der von ihnen ausgehenden Strahlung zu verringern.
Absorber Jeder Stoff, der ionisierende Strahlung und Neutronen absorbiert bzw. einfängt und damit deren Intensität verringert.
Aerosole Feinste Verunreinigungen der Luft, die meist im Schwebezustand verharren.
Aktivierung Bei diesem Vorgang werden Elemente durch Beschuß mit Neutronen oder ionisierender Strahlung radioaktiv.
Aktivierungsanalyse Leistungsfähiges Verfahren zur quantitativen und qualitativen Bestimmung chemischer Elemente mit Hilfe der für sie charakteristischen radioaktiven Strahlung, die durch Bestrahlen der zu analysierenden Proben ausgelöst wird.
Aktivität Eine Größe, welche die Zahl der je Sekunde zerfallenden Atomkerne angibt. Die SI-Einheit ist das Becquerel (Bq); 1 Bq entspricht einem Zerfall je Sekunde. Bisher verwendete Einheit Curie (Ci): 1 Ci $= 3{,}7 \cdot 10^{10}$ Bq.
spezifische Aktivität Quotient aus der Aktivität und der Masse eines strahlenden Stoffes.
Alphateilchen Eines der beim radioaktiven Zerfall ausgesandten positiv geladenen Teilchen. Es entspricht dem Kern eines Heliumatoms.

Alphaverhältnis Bei spaltbaren Kernen das Verhältnis von Einfangquerschnitt zu Spaltquerschnitt.
angeregter Zustand Zustand eines Atomkerns, wenn dieser mehr Energie hat als seinem energetischen Grundzustand entspricht.
angereichertes Uran Uran mit einem größeren Anteil Uran 235 als im natürlichen Uran (etwa 0,72%).
Antiteilchen Nach einer Theorie von *Dirac* gibt es zu jedem Elementarteilchen ein Antiteilchen, das genau die gleiche Masse, aber die entgegengesetzte Ladung hat.
Äquivalentdosis siehe biologische Dosis.
Atomkern Positiv geladener Kern eines Atoms, der – mit Ausnahme des Kerns des normalen Wasserstoffs – aus Protonen und Neutronen zusammengesetzt ist. Die Anzahl der Protonen bestimmt die Kernladungs- oder Ordnungszahl, die Anzahl der Protonen und Neutronen die Massenzahl des Kerns.
Autoradiographie Fotografische Aufzeichnung der Verteilung eines radioaktiven Stoffes durch die von diesem emittierte Strahlung.
Barn Frühere Einheit zur Angabe von Wirkungsquerschnitten in der Kernphysik, die etwa der Querschnittsfläche eines Atomkerns entspricht. 1 Barn (b) $= 10^{-28}$ m².
beschichtete Partikel Brennstoffkörnchen, die mit einer praktisch gasdichten Hülle aus pyrolytisch abgeschiedenem Graphit umgeben sind und in Hochtemperaturreaktoren eingesetzt werden.
Beschleuniger Gerät zur Beschleunigung elektrisch geladener Teilchen auf hohe Energien.
Betateilchen Ein Elektron oder Positron, das von einigen Atomkernen beim radioaktiven Zerfall ausgesandt wird.
Bindungsenergie Aufzuwendende Energie, um ein Neutron bzw. Proton aus einem Atomkern oder ein Elektron aus der Atomhülle zu entfernen.
biologische Dosis Maß der Schädlichkeit einer Strahlung für den Menschen. Die verschiedenen Arten energiereicher Strahler bewirken eine unterschiedliche Ionisationsdichte, d. h., sie übertragen je Einheit der Bahnlänge unterschiedlich große Energiebeträge auf die durchdrungene Materie. Damit ist auch die Wirkung auf das Körpergewebe unterschiedlich, die als relative biologische Wirksamkeit bezeichnet wird (RBW). Röntgenstrahlung aus einer Röhre mit 200 kV Spannung hat den RBW-Faktor 1, stark ionisierende Sekundärteilchen bei Neutronenbestrahlung und Alphateilchen haben RBW-Faktoren von 10 bis 20. Die biologische Dosis ist das Produkt aus Energiedosis und RBW-Faktor. Die SI-Einheit ist das Gray (Gy): 1 Gy = 1 J/kg. Die frühere Einheit war das Rem (röntgen equivalent man), 100 rem = 1 J/kg.
Borzähler Detektor für den Nachweis langsamer Neutronen, ist meistens als Proportionalzähler mit gasförmiger Füllung aufgebaut.
Becquerel Kurzzeichen Bq, siehe Aktivität.
Bremsstrahlung Elektromagnetische Strahlung, die bei der Beschleunigung oder Abbremsung elektrisch geladener Teilchen entsteht.
Bremszeit Zeitdauer des Prozesses, bei dem Spaltneutronen von der Entstehungsenergie (etwa 2 MeV) auf thermische Energie abgebremst werden.
Brennelement Teil des Kernreaktors, das den Brennstoff enthält. Hat vorwiegend die Form eines Stabes.
Brennstoffhülle Dichte und formfeste Hülle des Kernbrennstoffs, die gegen chemisch aktive Medien schützt und den Austritt von Spaltprodukten verhindert.
Brennstoffkassette Baueinheit des Reaktors, in der mehrere Brennelemente (Brennstäbe) zusammengefaßt sind.
Brennstoffkreislauf Die geschlossene Kette von Verfahrensstufen für die Versorgung der Kernreaktoren mit Brennstoff.
Brutreaktor Ein Reaktor, in dem durch Neutroneneinfang nichtspaltbares Material (Brutstoff) in spaltbares umgewandelt wird.

Coated Particles siehe beschichtete Partikel.

Comptoneffekt Tritt auf bei Wechselwirkung von Röntgen- oder Gammastrahlung mit Elektronen. Ein Teil der Energie des einfallenden Quants wird auf das Elektron übertragen.

Containment Sicherheitsbehälter eines Kernreaktors.

Curie Kurzzeichen Ci, siehe Aktivität.

Dekontamination Beseitigung oder Verringerung einer radioaktiven Verunreinigung (Kontamination).

Deuterium Wasserstoffisotop, dessen Kern ein Proton und im Unterschied zum normalen Wasserstoff außerdem ein Neutron enthält und daher etwa doppelt so schwer ist.

Diffusionstrennverfahren Isotopentrennverfahren, das bei der Diffusion von Atomen bzw. Molekülen durch eine poröse Wand die Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der jeweiligen Masse zur Trennung ausnutzt.

Dollar Einheit für die Reaktivität eines Kernreaktors, die auf den Anteil der verzögerten Neutronen an der Gesamtzahl der Spaltneutronen bezogen ist.

Dopplereffekt Im Kernreaktor wird damit die Änderung der Spaltungsquerschnitte bei unterschiedlichen relativen Geschwindigkeiten der Neutronen und der Spaltstoffatome bezeichnet. Größere Schwingungen der Atome des Brennstoffs bei steigender Betriebstemperatur können durch diesen Effekt die Reaktivität des Kernreaktors verändern.

Dosimeter Gerät zur Messung der Dosis bzw. Dosisleistung.

Dosis Energie, die bei der Wechselwirkung einer Strahlung mit der Materie an diese abgegeben wird, siehe Energiedosis.

Druckbehälter Dickwandiger Stahlbehälter, der bei einigen Typen von Kraftwerksreaktoren die Spaltzone druckfest umschließt.

Druckröhrenreaktor Kernreaktor, bei dem die Spaltzone aus zahlreichen Röhren zusammengesetzt ist, die den Brennstoff enthalten und in denen unter hohem Druck das Kühlmittel umläuft.

Druckwasserreaktor Kernreaktor, bei dem die Spaltzone durch Wasser gekühlt wird, das unter hohem Druck steht.

Elektron Elementarteilchen mit einer negativen elektrischen Elementarladung und einer Ruhemasse von $9{,}1 \cdot 10^{-31}$ kg.

Elektronenvolt Einheit der Energie in der Atom- und Kernphysik. Kurzzeichen eV. Ein Elektron gewinnt beim Durchlaufen einer Spannungsdifferenz von 1 Volt im Vakuum die kinetische Energie 1 eV $= 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Wattsekunden (Joule). Größere Einheiten:

1 keV = 1 Kiloelektronenvolt = 1000 eV
1 MeV = 1 Megaelektronenvolt = 1000000 eV
1 GeV = 1 Gigaelektronenvolt = 1000000000 eV

Elementarladung Kleinste elektrische Ladungseinheit $1{,}6021 \cdot 10^{-19}$ Coulomb.

Elementarteilchen Bezeichnung für diejenigen Teilchen, die sich nicht unmittelbar als zusammengesetzt erkennen lassen.

Endlagerung Endgültige Lagerstätte für radioaktive Abfälle.

Energiedosis Verhältnis aus der durch ionisierende Strahlung übertragenen Energie und der Masse der durchstrahlten Materie. Die Einheit ist Gray (Gy), 1 Gy = 1 J/kg. Die frühere Einheit war das Rad (rd), 100 rd = 1 J/kg.

Exkursion Unerwünscht schneller Leistungsanstieg eines Reaktors aufgrund einer starken Überkritizität.

Fallout Radioaktive Stoffe, die nach einer Kernexplosion auf die Erde zurückfallen.

Filmdosimeter Schwärzung eines fotografischen Films durch Strahleneinwirkung, wird als Maß für die Dosis verwendet.

Fotoeffekt Wechselwirkung von Gamma- und Röntgenstrahlung mit Materie. Die Energie der Strahlung wird dabei vollständig auf die Hüllelektronen der Atome übertragen.

Fotokatode Katode, in der Elektronen durch den Fotoeffekt oder lichtelektrischen Effekt freigesetzt werden.

Füllhalterdosimeter Auch Stabdosimeter. Die Entladung eines aufgeladenen Kondensators als Maß für die Dosis kann unmittelbar kontrolliert werden.

Fusion Bildung eines schweren Kerns aus leichteren Kernen, wobei die Bindungsenergie frei wird.

Gammastrahlung Hochenergetische, kurzwellige elektromagnetische Strahlung, die von Atomkernen emittiert wird.

Ganzkörperzähler Gerät zur Aktivitätsmessung und Identifizierung von radioaktiven Stoffen, die sich im Körper von Menschen oder Tieren abgesetzt haben.

Gasdiffusionsverfahren siehe Diffusionstrennverfahren.

Gasdurchflußzähler Zählrohr, dessen Füllgas durch ständigen Durchfluß neu ersetzt wird.

gasgekühlter Reaktor Kernreaktor, bei dem Gas (Kohlendioxid, Helium) als Kühlmittel verwendet wird.

Gasverstärkung Durch Stoßionisation bewirkte Vermehrung der Zahl der Ladungsträger in einem Zählrohr.

Gaszentrifugenverfahren Verfahren zur Isotopentrennung, bei dem die unterschiedlichen Zentrifugalkräfte auf verschieden schwere Atome ausgenutzt werden.

GAU Größter anzunehmender Unfall in einer kerntechnischen Anlage.

Geiger-Müller-Zählrohr Gasgefüllte zylinderförmige Röhre, in der eine elektrische Entladung abläuft, wenn ionisierende Strahlung sie durchdringt.

Halbleiterzähler Zum Nachweis von radioaktiver Strahlung wird der Effekt ausgenutzt, daß bei Bestrahlung von Halbleitermaterial freie Ladungsträger (Elektronen-Loch-Paare) erzeugt werden.

Halbwertdicke Schichtdicke eines Stoffes, der die Intensität von radioaktiver Strahlung um die Hälfte herabsetzt.

Halbwertzeit Zeit, in der die Hälfte der Kerne eines radioaktiven Stoffes zerfällt.

heiße Zellen Stark abgeschirmter und luftdicht abgeschlossener kleiner Raum, in dem stark radioaktive (heiße) Stoffe fernbedient behandelt werden können.

heterogener Reaktor Kernreaktor, in dem Brennstoff und Moderator getrennt voneinander angeordnet sind.

Höhenstrahlung siehe kosmische Strahlung.

homogener Reaktor Reaktor, in dem Brennstoff und Moderator gemischt vorliegen.

höchstzulässige Dosis Von Sachverständigen als Höchstmaß der Dosis festgelegt, die vom Menschen noch aufgenommen werden kann, ohne die Gesundheit unzulässig zu gefährden.

Hochtemperaturreaktor Kurzbezeichnung HTR, teilweise HTGR, um die Gaskühlung hervorzuheben. Das gasförmige Kühlmedium erreicht Temperaturen bis etwa 1 000 °C.

IAEA International Atomic Energy Agency, Internationale Atomenergie-Organisation, Sitz Wien.

Impulshöhenanalyse Elektronisches Verfahren zur Ermittlung des Energiespektrums einer Strahlung.

Incore Ausdruck zur Kennzeichnung von Geräten, die innerhalb der Spaltzone eines Reaktors verwendet werden.

Indikator Radioaktiver Stoff, der auch bei geringer Beimischung in Prozessen aller Art durch seine Strahlung leicht zu verfolgen ist.

induzierte Radioaktivität Durch Beschuß mit Neutronen oder geladenen Teilchen ausgelöste Radioaktivität.

Inkorporation Aufnahme radioaktiver Substanzen in den menschlichen Körper.

Ion Elektrisch geladenes Atom oder Molekül.

Ionendosis Maßeinheit für die Strahlungsmenge, die in einer Masse von 1 kg durch Ionisation eine Ladung von 1 Coulomb = 1 Amperesekunde erzeugt (C/kg). Früher galt die Einheit Röntgen, $1\,R = 2{,}58 \cdot 10^{-4}$ C/kg.
Ionisation Aufnahme oder Abgabe von Elektronen durch Atome oder Moleküle.
Ionisationskammer Detektor zum Nachweis ionisierender Strahlung. Mittels Strahlenwirkung wird das Füllgas der Kammer elektrisch leitend gemacht und dadurch ein elektrischer Strom zwischen zwei entgegengesetzt geladenen Elektroden bewirkt.
ionisierende Strahlung Bezeichnung für alle Strahlungsarten, welche direkt (Alpha-, Beta-, Gammastrahlung) oder indirekt (Neutronen) in durchstrahlten Substanzen durch Ionisation elektrische Ladungsträger (Elektronen-Ionen oder Elektronen-Loch-Paare) freisetzt.
Isotope Atome mit Kernen gleicher Protonenzahl (d. h. des gleichen chemischen Elements), jedoch mit unterschiedlich vielen Neutronen.
Isotopenanreicherung Prozeß, bei dem die relative Häufigkeit eines Isotops in einem Gemisch vergrößert wird.
Isotopenhäufigkeit Zahlengröße, die die Anzahl der Atome eines Isotops in einem Gemisch zur Gesamtzahl der Atome eines Elements in diesem Gemisch ins Verhältnis setzt.
Isotopentrennung Verfahren zur Abtrennung von Isotopen aus Gemischen.
Joule Einheit der Energie, Kurzzeichen J, $1\,J = 0{,}23885$ cal $= 6{,}2421 \cdot 10^{18}$ eV.
K-Einfang Einfang eines Bahnelektrons aus der K-Schale der Atomhülle durch den Atomkern, wobei sich im Kern ein Proton in ein Neutron umwandelt. Das dadurch entstandene neue Element hat eine um eine Einheit kleinere Ordnungszahl.
Kernbrennstoff Material, das spaltbare Atomkerne enthält.
Kernfusion siehe Fusion.
Kernkraftwerk Anlage zur Nutzung der Kernenergie im industriellen Maßstab.
Kernladungszahl Stimmt mit der Anzahl der Protonen im Kern überein und ist gleich der Ordnungszahl.
Kernreaktor Anlage, in der sich die Kettenreaktion der Kernspaltung einleiten, aufrechterhalten und steuern läßt.
Kernspaltung Spaltung eines schweren Atomkerns in zwei mittlere Kerne, wobei außerdem teilweise unmittelbar, teilweise verzögert insgesamt zwei bis drei Neutronen freigesetzt werden.
Kettenreaktion Reaktion, die sich von selbst fortsetzt.
Koinzidenz Zusammenfall zweier Ereignisse in einer vorgegebenen Zeitspanne.
Kollimator Eine Vorrichtung, mit deren Hilfe aus der Strahlung einer Quelle, die in alle Richtungen gleichmäßig austritt, ein paralleles Strahlenbündel ausgeblendet wird.
Konversion bedeutet in der Reaktortechnik die Umwandlung einer nichtspaltbaren Substanz in einen spaltbaren Stoff.
Konversionselektron Elektron, das durch die Energie eines Gammaquants desselben Kerns aus der Atomhülle losgelöst wurde.
Konverterreaktor Kernreaktor, der durch den Brutprozeß spaltbares Material erzeugt, jedoch weniger als er dabei verbraucht.
Konzentration, maximal zulässige Höchstwert der Konzentration eines radioaktiven Stoffes in der Luft, im Wasser oder in Lebensmitteln, der bei Dauerbelastung dem Menschen ohne gesundheitliche Gefährdung zugemutet werden kann.
kosmische Strahlung Verschiedenartige Strahlung mit sehr hoher Energie, die aus Quellen außerhalb der Erde herrührt.
kritisch Der Zustand eines Reaktors heißt kritisch, wenn im Ablauf der Kettenreaktion der Kernspaltung ebensoviel Neutronen erzeugt werden, wie durch Einfang und Herausfliegen verlorengehen. Der kritische Zustand ist der normale Betriebszustand des Reaktors.

kritische Anordnung Eine Anordnung aus geeignetem Material zur Aufrechterhaltung der Kettenreaktion der Kernspaltung. Sie wird vorwiegend bei niedriger Leistung (geringe Neutronendichte) zu Versuchszwecken betrieben.

kritische Größe Mindestabmessung einer bestimmten Spaltstoff- und Moderatoranordnung, damit der kritische Zustand erreicht werden kann.

kritische Masse Kleinste Spaltstoffmasse, in der eine sich selbst erhaltende Kettenreaktion ablaufen kann.

kritisches Experiment Bezeichnung für den Vorgang, bei dem im Reaktor erstmalig der kritische Zustand erreicht wird.

kritisch, prompt Zustand, in dem der Reaktor allein durch die prompten Spaltungsneutronen und ohne den Beitrag der verzögerten Neutronen kritisch ist.

kritisch, verzögert Bedeutet das gleiche wie kritisch. Bei Verwendung dieses Begriffes soll besonders darauf hingewiesen werden, daß der Beitrag der verzögerten Neutronen notwendig ist, um den kritischen Zustand zu erreichen.

Kugelhaufenreaktor Gasgekühlter Hochtemperaturreaktor, in dessen Spaltzone sich Graphitkugeln mit Brennstoffanteil in loser Schüttung befinden.

Kühlmittel Medien, die der Wärmeabführung dienen. Im Kernreaktor üblich sind leichtes und schweres Wasser, Helium, flüssiges Natrium und Kohlendioxid.

Lebensdauer, mittlere Das ist die Zeitspanne, in der die Anzahl radioaktiver Kerne um den Faktor 1/e abnimmt. Dabei ist e = 2,71828 die Basis der natürlichen Logarithmen.

Leichtwasserreaktor Sammelbezeichnung für alle Reaktoren, bei denen Wasser als Moderator und Kühlmittel eingesetzt wird (Druckwasser- und Siedewasserreaktoren).

Leistungsdichte Maß für die erzeugte Wärmeleistung je Volumeneinheit der Spaltzone.

Leistung, spezifische Maß für die erzeugte Wärmeleistung je Masseeinheit des Brennstoffs.

Leistungsreaktor Kernreaktor, der im industriellen Maßstab genutzt wird.

Letaldosis Die den sicheren Tod bewirkende Dosis ionisierender Strahlung. Sie beträgt 0,155 C/kg = 600 R (siehe Ionendosis).

Manipulator Mechanisches und elektromechanisches Hilfsmittel zur fernbedienten Handhabung radioaktiver Stoffe.

Markierung Einer Substanz werden in geringster Menge radioaktive Atome beigemischt, durch deren Strahlung der Weg der Substanz in verschiedenen Objekten gut zu verfolgen ist.

Masse-Energie-Beziehung Einsteinsche Formel für die Äquivalenz von Masse und Energie ($W = m \cdot c^2$).

Massendefekt Damit wird die Tatsache bezeichnet, daß die Atomkerne eine kleinere Ruhemasse haben, als der Summe der Ruhemassen der einzelnen Bausteine entspricht. Der Massendefekt entspricht der Bindungsenergie der Bausteine.

Massenspektrometer Gerät zur Bestimmung der Isotopenmasse mit Hilfe von elektrischen und magnetischen Feldern.

Massezahl Angabe über die Anzahl der Masseeinheiten in einem Atomkern, stimmt mit der Anzahl der Nukleonen überein.

Megawatt Kurzzeichen MW, 1 MW = 1000000 Watt.

MeV Megaelektronenvolt, siehe Elektronenvolt.

Moderator Material, dessen Atomkerne geeignet sind, schnelle Neutronen auf langsame Geschwindigkeiten abzubremsen.

Moderierung Der durch den Moderator bewirkte Prozeß der Abbremsung von Neutronen.

Monazit Rötlichbraunes bis gelbes Mineral, ein Phosphat der seltenen Erden Zer, Neodym, Praseodym, Lanthan, zuweilen Thorium.

Monitor Überwachungsgerät.
Multiplikationsfaktor Maß für die Vermehrung der Neutronen, ist gleich 1 für den kritischen Reaktor.
MW siehe Megawatt.
MWd Megawatt-Tag, Energieeinheit. Bei vollständiger Spaltung von 1 g Uran 235 wird eine Energie von etwa 1 MWd frei.
MWd/t Megawatt-Tag je Tonne, wird als Einheit für die von 1 t Kernbrennstoff während der Verwendungszeit im Reaktor erzeugte Wärmeleistung verwendet.
MW (el) Megawatt elektrisch, wird zur Angabe der elektrischen Leistung eines Kernkraftwerkes verwendet.
MW (th) Megawatt thermisch, Wärmeleistung eines Kernreaktors in Megawatt.
Nachwärme Wärme, die nach Abschalten des Reaktors durch den radioaktiven Zerfall von Spaltprodukten und von aktivierten Bauteilen erzeugt wird.
Natururan Uran in der Zusammensetzung aus den Isotopen U 238 (99, 2739%), U 235 (0,7205%) und U 234 (0,0056%), in der es in der Natur vorkommt.
Nebelkammer Von Wilson erfundenes Gerät, das die Bahnen elektrisch geladener Teilchen sichtbar macht.
Neutrino Elektrisch neutrales und nahezu masseloses Elementarteilchen, das u. a. beim Betazerfall entsteht.
Neutron Ungeladenes Elementarteilchen mit $1{,}67482 \cdot 10^{-27}$ kg Masse. Als freies Neutron zerfällt es mit einer Halbwertszeit von 11,5 Minuten in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino.
Neutronen, prompte Neutronen, die in der äußerst kurzen Zeitspanne von 10^{-14} s bei der Kernspaltung mit einer kinetischen Energie von etwa 2 MeV entstehen. Sie machen etwas mehr als 99% der gesamten Spaltneutronen aus.
Neutronen, schnelle Neutronen mit einer kinetischen Energie von mehr als 100 keV = 0,1 MeV.
Neutronen, thermische Neutronen im energetischen Gleichgewicht mit dem umgebenden Medium. Sie haben bei Raumtemperatur eine Geschwindigkeit von etwa 2200 m/s, das entspricht einer Energie von 0,025 eV.
Neutronen, verzögerte Etwas weniger als 1% der Spaltneutronen werden um Sek. bis Min. verzögert nach der Spaltung als Folge der radioaktiven Umwandlung von Spaltprodukten erzeugt.
Notkühlung Zwecks größerer Sicherheit mehrfach ausgelegtes Kühlsystem, das bei Ausfall der betriebsmäßigen Anlage in Funktion tritt und auch unter ungünstigen Umständen eine Abführung der Nachwärme aus dem Reaktor sichert.
Nukleon Bezeichnung für die Kernbausteine Proton und Neutron.
Nuklid Atomkern, der durch seine Protonen- und Neutronenzahl charakterisiert ist. Im Unterschied dazu ist die Ordnungszahl der Elemente allein durch die Protonenzahl festgelegt.
Nulleffekt Unerwünschter, aber unvermeidlicher Beitrag zur Messung von ionisierender Strahlung durch die kosmische Strahlung und die natürlichen Radionuklide der Erde.
Nulleistungsreaktor Bezeichnung für Versuchsreaktoren mit einer thermischen Leistung bis etwa 10 kW.
Ordnungszahl Anzahl der Protonen in einem Atomkern. Grundlage der Anordnung im Periodensystem der Elemente.
Paarbildungseffekt Geburt eines Elektron-Positron-Paares auf Kosten der Energie eines Quants. Sie kann nur bei Quantenenergien oberhalb 1,02 MeV und aus Gründen der Impulserhaltung nur in der Nähe eines Atomkerns stattfinden.
Pellet Bezeichnung für Brennstofftabletten.
Photon Energiequant der elektromagnetischen Strahlung mit der Ruhemasse 0.
Plasma Nach außen insgesamt elektrisch neutral wirkendes Gasgemisch aus Ionen, Elektronen und ungeladenen Teilchen.

Plutonium Radioaktives, metallisches Element. In der Kernenergetik spielt das spaltbare Isotop Plutonium 239 eine wichtige Rolle, das durch Neutroneneinfang aus dem nur bedingt spaltbaren Uran 238 entsteht. Plutonium ist sehr radiotoxisch, deshalb beträgt die maximal zulässige Konzentration von Plutonium 239 in Luft nur etwa 10^{-11} g/m³.

Positron Elementarteilchen mit positiver Ladung und der Masse eines Elektrons, also ein Antielektron.

Primärenergie Primärenergieträger sind alle festen, flüssigen und gasförmigen Brennstoffe sowie Kernenergie, Wasserkraft und Erdwärme.

Primärkreislauf Erster Kühlkreislauf, der zum Abführen der Wärme aus der Spaltzone des Reaktors dient.

Rad Bisherige Einheit der Energiedosis.

radioaktive Datierung Verfahren zur Bestimmung des Alters eines Gegenstandes, der aus stabilen und radioaktiven Isotopen zusammengesetzt ist.

Radioaktivität Bezeichnung für die Eigenschaft bestimmter Atomkerne, sich unter Aussendung von Strahlung umzuwandeln. Es gibt natürliche sowie künstlich durch Bestrahlung hervorgerufene Radioaktivität.

Radiographie Materialuntersuchung bei Verwendung durchdringender ionisierender Strahlung.

Radiologie Teilbereich der Medizin, in dem ionisierende Strahlung für Diagnose und Therapie verwendet wird.

Radiolyse Aufspaltung von Molekülen durch Strahlung.

Radionuklid Instabiles Nuklid, das unter Aussendung von Strahlung zerfällt.

Radionuklidbatterie Batterie, in der die durch radioaktive Strahlung von Radionukliden erzeugte Wärme direkt in elektrische Energie umgewandelt wird.

Radiotoxizität Maß für die gesundheitsschädigende Wirkung radioaktiver Stoffe.

Radium Radioaktives Element, das über eine Reihe von Zwischengliedern durch den Zerfall von Uran entsteht.

Reaktivität Angabe darüber, wie weit ein Reaktor vom kritischen Zustand entfernt ist, d. h. über die Neutronenvermehrung im Vergleich zum kritischen Reaktor.

Reaktor Anlage, in der sich die Kettenreaktion der Kernspaltung einleiten und steuern läßt.

Reaktor, schneller Reaktor, in dem es vorwiegend schnelle Neutronen gibt.

Reaktor, thermischer Reaktor, in dem es vorwiegend thermische Neutronen gibt.

Reaktorgift Substanz, die infolge der Kernspaltung im Reaktor entsteht und die in unerwünschter Weise ein starkes Bestreben zeigt, Neutronen einzufangen.

Reaktorperiode Zeit, in der in einem Reaktor die Neutronenflußdichte bei exponentiellem Verlauf um den Faktor $e = 2{,}71828$ zu- oder abnimmt.

Reaktorsicherheitssystem Elektronische Anlage, die alle für den sicheren Betrieb des Reaktors wesentlichen Meßgrößen erfaßt, verarbeitet, Grenzwerte überwacht und im gegebenen Fall automatisch Schaltungen auslöst, durch die der Reaktor teilweise oder vollständig abgeschaltet wird.

Reaktorsteuerung Handbediente oder automatische Einstellung von Regelstäben, um einen angestrebten Betriebszustand des Reaktors zu erreichen.

Reflektor Unmittelbar um die Spaltzone angeordnete Materialschicht, durch die aus dem Reaktor herausfliegende Neutronen teilweise wieder zurückgestreut werden.

Regelstab Stab aus neutronenabsorbierendem Material, mit dessen Hilfe die Kettenreaktion der Kernspaltung gesteuert werden kann.

relative Atommasse (früher Atomgewicht) Relativzahl für die Masse eines Atoms, die gemäß einer seit 1961 gültigen Vereinbarung auf die atomare Masseeinheit bezogen ist. Die atomare Masseeinheit (u) ist definiert als der 12te Teil der Masse eines Atoms des Kohlenstoffisotops C 12. $1\ u = 1{,}66057 \cdot 10^{-27}$ kg.

Röntgen Bisherige Einheit der Ionendosis.
Röntgenstrahlung Durchdringende elektromagnetische Strahlung. Unterscheidet sich von der Gammastrahlung nur dadurch, daß sie auf eine andere Art entsteht und meistens eine geringere Energie hat.
Ruheenergie Nach der Masse-Energie-Beziehung berechenbares Energieäquivalent der Masse eines ruhenden Körpers.
SAAS Staatliches Amt für Atomsicherheit und Strahlenschutz der DDR.
Schild, biologischer siehe Abschirmung.
Schild, thermischer Abschirmung innerhalb des Druckgefäßes eines Reaktors, um die Intensität der Wärme- und radioaktiven Strahlung auf die Gefäßwand zu verringern.
Schwellenwertdosis Kleinste biologische Dosis, die eine bestimmte Wirkung hervorruft.
schweres Wasser Deuteriumoxid, als Bremsmittel für Neutronen geeignet. Die Masse des schweren Wassers verhält sich zu derjenigen des normalen Wassers wie 20 zu 18.
Schwerwasserreaktor Kernreaktor, in dem schweres Wasser als Moderator oder Kühlmittel verwendet wird.
Sekundärkühlkreis Kühlkreislauf, der über ein dafür eingerichtetes System die Wärme aus dem ersten Kreislauf übernimmt und abführt.
Selbstabsorption Schwächung einer Strahlung in der strahlenden Substanz selbst.
Sicherheitsbehälter Gasdichte Umhüllung eines Kernreaktors einschließlich des ersten Kühlkreislaufs, die so ausgelegt ist, daß auch bei einem Unfall keine radioaktiven Stoffe entweichen können.
Siedewasserreaktor Reaktor mit Wasser als Moderator und Kühlmittel. Das Wasser wird in der Spaltzone bis zum Sieden erhitzt und kann daher unmittelbar zum Antrieb einer Turbine verwendet werden.
Spaltgas Gasförmiges Spaltprodukt.
Spaltgasraum Leerer Teil eines Brennstoffstabes, der zum Auffangen des Spaltgases vorgesehen ist.
Spaltkammer Neutronendetektor, in dem spaltbares Material verwendet wird.
Spaltneutronen Durch den Prozeß der Kernspaltung erzeugtes Neutron.
Spaltprodukte Stoffe, die durch Kernspaltung erzeugt werden, bzw. ihre durch radioaktiven Zerfall entstehenden Folgeprodukte.
Spaltstoff Stoffe, deren Kerne durch Neutroneneinfang gespalten werden können.
Spaltung, spontane Eigenschaft einiger sehr schwerer Atomkerne, sich ohne Anregung von außen zu spalten. In jedem Gramm Uran 238 spaltet sich alle 2 bis 3 Minuten ein Kern auf diese Weise.
Spaltung, thermische Durch thermische Neutronen bewirkte Kernspaltung.
Spaltzone Teil des Reaktors, in dem die Kettenreaktion der Kernspaltung abläuft.
spezifische Aktivität Quotient aus der Aktivität und der Masse eines strahlenden Stoffes.
Steuerstab siehe Regelstab.
Strahlenschutz Maßnahmen zum Schutz vor der schädigenden Wirkung radioaktiver Strahlung.
Strahlungsdetektor Gerät oder Substanz, die zum Nachweis der Intensität oder zur Ermittlung der Energie von Strahlung eingesetzt werden kann.
Streuung Änderung der Richtung oder der Energie eines Teilchens durch Zusammenstoß mit einem anderen Teilchen.
Streuung, elastische Wechselwirkung durch Stoß, bei der die Summe der kinetischen Energie der beteiligten Teilchen vor und nach dem Vorgang unverändert ist.
Streuung, unelastische Wechselwirkung durch Stoß, bei der ein Teil der

kinetischen Energie der beteiligten Teilchen in eine andere Energieform umgewandelt wird.

Streuweglänge Weg eines Teilchens, den es zwischen zwei Streuprozessen ohne Behinderung zurücklegt.

Target Dünne Scheibe mit einer Schicht aus einer Substanz, in der durch auftreffende Strahlung kernphysikalische Prozesse ausgelöst werden.

Temperaturkoeffizient der Reaktivität Angabe über die Abhängigkeit der Reaktivität eines Kernreaktors von der Temperatur.

terrestrische Strahlung Strahlung, die von den in der Erde vorhandenen radioaktiven Stoffen herrührt.

thermionische Wandler Anordnung zur direkten Umwandlung von Wärmeenergie in Elektrizität. Die Elektronen verdampfen aus heißen Metallflächen und kondensieren auf gekühlten Flächen.

thermischer Brutreaktor thermischer Reaktor, in dem nichtspaltbares Thorium 232 in spaltbares Uran 233 verwandelt wird.

thermische Säule In einigen Forschungsreaktoren vorhandene zusätzliche Zone mit viel Moderatormaterial, um den Anteil der thermischen Neutronen am Gesamtspektrum wesentlich zu vergrößern.

thermoelektrischer Kernreaktor System, das die bei der Kettenreaktion der Kernspaltung entstehende Wärme mit Hilfe von Thermoelementen direkt in Elektrizität umwandelt.

Thermionikzelle Zur direkten Umwandlung von nuklearer Wärme in Elektrizität eingesetzte luftleere Zelle mit zwei Elektroden aus Halbleitermaterial, zwischen denen infolge eines starken Temperaturgefälles eine elektrische Spannung entsteht.

thermonukleare Reaktion Bei außerordentlich hoher Temperatur ablaufende Verschmelzung zweier leichter Kerne. Die Masse des entstehenden Kerns ist geringer als die der beiden Ausgangskerne. Die Massendifferenz wird bei der Reaktion in Energie verwandelt.

Thorium Natürliches radioaktives Element. Das Isotop 232 kann durch Neutroneneinfang in spaltbares Uran 233 verwandelt werden.

Tokamak Typ einer Anlage für plasmaphysikalische Experimente, in der man zur Zeit den für die gesteuerte Kernfusion notwendigen Bedingungen am nächsten kommt.

Transurane Chemische Elemente, die künstlich erzeugt werden müssen und deren Ordnungszahl im Periodensystem der Elemente größer ist als die des Urans: Neptunium (Ordnungszahl 93), Plutonium (94), Amerizium (95), Curium (96), Berkelium (97), Kalifornium (98), Einsteinium (99), Fermium (100), Mendelevium (101), Nobelium (102), Lawrenzium (103), Kurtschatowium (104), Bohrium (105). Die in Dubna erzeugten Elemente 106 und 107 sind noch namenlos.

Trennarbeit Maß für den Aufwand, der bei der Isotopentrennung für die Anreicherung eines Isotops zu leisten ist.

Trenndüsenverfahren Verfahren zur Isotopentrennung durch Ausnutzung unterschiedlicher Zentrifugalkräfte auf Isotope in einem gasförmigen Gemisch, das in eine Düse umgelenkt wird.

Trennfaktor Maß für die Anreicherung eines Isotops in einem Gemisch.

Trimmstäbe Stabförmige Absorber, die zur Kompensation der Überschußreaktivität eines frisch beladenen Reaktors eingesetzt werden.

Tritium Radioaktives Isotop des Wasserstoffs, dessen Atomkerne zwei Neutronen und ein Proton enthalten.

Tscherenkowstrahlung Blaues Licht, das entsteht, wenn geladene Teilchen sich in einem lichtdurchlässigen Stoff mit einer Geschwindigkeit bewegen, die größer ist als die Lichtgeschwindigkeit in diesem Medium.

überkritischer Reaktor System mit einem Multiplikationsfaktor größer als 1, in dem die Kettenreaktion der Kernspaltung lawinenartig anschwillt.

Überschußreaktivität Größe der Reaktivität, um die ein frisch beladener Reaktor überkritisch ist.
Unfall, größter anzunehmender siehe GAU
unterkritische Anordnung Meist zu Versuchszwecken aufgebaute Anlage mit nur so viel Kernbrennstoff, daß die Kettenreaktion der Kernspaltung sich nicht selbst aufrechterhalten kann.
Uran Natürliches radioaktives Element der Kernladungszahl 92.
Uranhexafluorid (UF_6) Gasförmige Uranverbindung, die bei allen Isotopentrennverfahren zur Anreicherung von Uran 235 verwendet wird.
Van-de-Graaff-Generator Apparatur zur Erzeugung sehr hoher Gleichspannung, die zur Beschleunigung geladener Teilchen auf hohe Energien eingesetzt wird. Dabei wird mit Hilfe eines endlosen Bandes elektrostatische Ladung auf eine isolierte Kugel transportiert.
Verfügbarkeit Maß für die Erfüllung der Betriebsfunktion einer Anlage. Man unterscheidet zeitliche Verfügbarkeit und Arbeitsverfügbarkeit, mit der das Verhältnis der verfügbaren zur theoretisch möglichen Arbeit in der Berichtszeit ausgedrückt wird.
Vielkanalanalysator Elektronische Apparatur, in der Impulse entsprechend ihrer Spannungsamplitude sortiert werden.
Wiederaufbereitung Bearbeitungsvorgänge, um den aus den Reaktoren entnommenen Brennstoff der neuerlichen Verwendung zuzuführen.
Wirkungsquerschnitt Maß für die Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer Kernreaktion.
Xenonvergiftung Störung des Neutronenhaushalts in einem Reaktor durch das Spaltprodukt Xenon 135, das in starkem Maße Neutronen absorbiert.
Zählrohr siehe Geiger-Müller-Zählrohr und Proportionalzählrohr.
Zerfall Spontane Umwandlung eines Atomkerns in einen anderen.
Zircaloy Zirkonlegierung, die als Hüllwerkstoff für Brennstoffstäbe verwendet wird.
Zyklotron Teilchenbeschleuniger, in dem geladene Teilchen auf einer spiralförmigen Bahn wiederholt ein elektrisches Feld durchlaufen.

Literaturverzeichnis

Bogoljubow, N. N.: Interview. – Spektrum 1976, Heft 4

Born, M., und *L. Infeld*: Erinnerungen an Einstein. Berlin: Union-Verlag 1967

Chadwick, J.: Vortrag auf der Tagung der Royal Society London 1932. Übersetzt von R. Kissener. In: *Brinck, D. M.*: Kernkräfte – Einführung und Originaltexte. Berlin: Akademie-Verlag 1971

Einstein, A.: Zur Elektrodynamik bewegter Körper. In: Annalen der Physik, Bd. 17, Berlin 1905

Einstein, A.: Brief an den USA-Präsidenten. In: *Golowin, N.*: J. W. Kurtschatow. Leipzig–Jena–Berlin: Urania-Verlag 1976

Flügge, S.: Artikel in der »Deutschen Allgemeinen Zeitung« vom 15. August 1939

Gerlach, W.: Nachruf auf Otto Hahn. In: Jahrbuch der Akademie der Wissenschaften. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht Verlagsbuchhandlung 1968

Golowin, I. N.: J. W. Kurtschatow – Wegbereiter der sowjetischen Atomforschung. Leipzig–Jena–Berlin: Urania-Verlag 1976

Hahn, O.: Die Nutzbarmachung der Energie der Atomkerne. München: R. Oldenbourg Verlag GmbH 1950

Hartmann, W.: Handbuch der Meßtechnik in der Betriebskontrolle, Band V. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G. 1969

Heisenberg, W.: Der Teil und das Ganze. München: Verlag R. Piper & Co. 1969

Herneck, F.: Bahnbrecher des Atomzeitalters. Berlin: Buchverlag Der Morgen 1974

Ignatenko, V., und *N. Lossinski*: Das dürfen wir nie vergessen! – Sputnik, Heft 8 (1975)

Infeld, L.: Albert Einstein. Berlin: Akademie-Verlag 1957

Jungk, R.: Heller als Tausend Sonnen. Stuttgart–Zürich–Salzburg: Europäischer Buchklub

Jungk, R.: Strahlen aus der Asche. Berlin: Verlag Volk und Welt 1961

Klare, H.: Geleitwort zum Mitteilungsblatt für die Akademie der Wissenschaften der DDR. – »Spektrum«, Bd. 11 (1965), Heft 12

Kluge, W., u. a.: Die Elektroenergie – die Energieform mit den höchsten Zuwachsraten. In: Energie aktuell. Leipzig–Jena–Berlin: Urania-Verlag 1975

Lajne, O.: Warum die Kommunisten für Frieden kämpfen. – Sputnik, Heft 1 (1977)

Libby, W. F.: Altersbestimmung mit der C-14-Methode. Mannheim–Zürich: Bibliographisches Institut

Niese, S.: Spurenanalyse. – Urania, Heft 3 (1976)

Osada, A.: Kinder von Hiroshima. Berlin: Verlag Volk und Welt 1966

Petrosjanz, A. M.: Das Atom – Forschung und Nutzung. Berlin: Akademie-Verlag 1973

Ponomarjow, L. J.: Welle oder Teilchen. Moskau: Verlag Mir 1974

Rutherford, E.: Vortrag auf der Tagung der Royal Society London 1929. Übersetzt von R. Kissener. In: *Brink, D. M.*: Kernkräfte – Einführung und Originaltexte. Berlin: Akademie-Verlag 1971

Stulz, P.: Schlaglicht Atom. Berlin: Militärverlag der DDR 1973

Thomson, G.: Das Atom. Göttingen: Musterschmidt Verlag 1952

Valentini, H. B.: Die gesteuerte Kernfusion als künftige Energiequelle. In: Urania-Universum, Bd. 16. Leipzig–Jena–Berlin: Urania-Verlag 1970

Bildnachweis

ADN-Zentralbild: 11, 12, 127
VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig: 96, 99, 106
Deutsches Atomforum e. V. Bonn: 95, 111, 112, 121, 123; Interatom: 114; Kraftwerk Union: 94, 98, 107
Deutsches Museum München: 79
DEWAG-Berlin: 103, 109, 122
Dietzsch, W.: Meßelektronik-Mitteilungen 1971: 52
VEB Fachbuchverlag, Leipzig: 1, 3, 5 bis 9, 15, 17, 19, 21 bis 23, 25, 27, 28, 44, 54, 55, 68, 70, 78, 81, 93, 126, 128, 141
Gursky, S., Leipzig: 66
Kiesling, G., Berlin: 76
Kliefoth, W.: Atomkernreaktoren. Bonn: Deutsches Atomforum 1968: 82
Koch, R., ZfK Rossendorf: 108
Presseagentur Nowosti: 97, 102, 103, 104, 105, 110, 115
VEB RFT Meßelektronik »Otto Schön« Dresden: 26, 30, 37, 38, 39, 40, 42, 47, 48, 53; C. Darre: 32, 33, 61; G. Zimmer: 43, 45, 62
Siemens AG: 64
Techsnabexport: 67, 71, 73
Träber, K. H.: Holztechnologie 1973, H. 14: 46
Urania-Verlag Leipzig–Jena–Berlin: 119, 120, 130
Verlag Zeit im Bild, Dresden: 132
ZfK Rossendorf, Archiv: 18, 133, 134, 136, 138, 139

Sachwortverzeichnis

